



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ





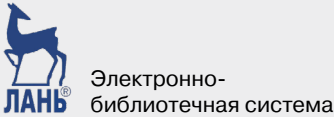


TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 9 март 2023 № 1



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

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

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

Подписано в печать 10.03.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 15,37. Уч.-изд. л. 12,7. Тираж 200 экз. Заказ .

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

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

EDITORIAL BOARD

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

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
Учредитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»	ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ <i>Корнев Д. А.</i> Влияние алгоритма управления на технические характеристики движения поездов7 <i>Швалов Д. В.</i> Алгоритмы принятия решений для автоматизированного выполнения и планирования работ по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность 19
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022	СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ <i>Сидоренко В. Г., Копылова Е. В., Сафронов А. И., Туманов М. А.</i> Опыт и перспективы автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций 33
Главный редактор А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС, заведующий кафедрой	ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ <i>Сидоренко В. Г., Сафронов А. И.</i> Применение генетических алгоритмов при решении задач планирования перевозочного процесса городской рельсовой транспортной системы..... 49
Редакция журнала Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — Д. В. Деметьева Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>Ковалев К. Е., Новичихин А. В., Сакович И. Л., Болотин В. А.</i> Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования 72
Адрес учредителя 190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Телефон: +7(812)457-85-79 E-mail: ait.automatika@yandex.ru Сайт: www.atjournal.ru	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Сальникова А. Д., Баните А. В., Плотников Д. Г., Кашталинский А. С.</i> Формирование системы транспортно-пересадочных узлов в городской агломерации 87
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023
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	ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ <i>Никитин А. Б., Наседкин О. А., Лыков А. А., Журавлева Н. А., Хомоненко А. Д., Копытов Д. В.</i> Интеллектуальные функции управления в микропроцессорных системах централизации 63
Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33316	Построение самопроверяемых цифровых устройств на основе модифицированных кодов Хэмминга с контролем самодвойственности вычисляемых функций 99

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>Kornev D. A.</i> Influence of Control Algorithm on Train Traffic Technical Characteristics7
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № ЭА94514, 19.12.2022	<i>Shvalov D. V.</i> Decision-Making Algorithms for Automated Performance and Scheduling of Shunt Sensitivity Testing of Rail Circuits..... 19
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of Department	TRANSPORT CONTROL SYSTEMS <i>Sidorenko V. G., Kopylova E. V., Safronov A. I., Tumanov M. A.</i> Experience and Perspectives of Transportation Process Control Automation for Rapid-Transit Transport of Urban Agglomerations 33
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	INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS <i>Sidorenko V. G., Safronov A. I.</i> Application of Genetic Algorithms at Solution of Tasks for Transportation Process Planning of City Rail Transport System 49
FOUNDER'S ADDRESS 190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote control on Railways» department +7(812) 457-85-79 ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	<i>Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Lykov A. A., Zhuravleva N. A., Khomonenko A. D., Kopytov D. V.</i> Intelligent Control Functions in Microprocessor Interlocking Systems..... 63
PUBLISHER'S ADDRESS 127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	ELECTRONIC SIMULATION <i>Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Sakovich I. L., Bolotin V. A.</i> Diagnostics Mechanism of Low-Density Railway Lines on the Basis of Fuzzy Cognitive Modeling 72
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	<i>Salnikova A. D., Banite A. V., Plotnikov D. G., Kashtalinsky A. S.</i> Formation of Transport Hub System in Urban Agglomeration 87
Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33316 © PGUPS, 2023	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Efanov D. V., Pogodina T. S.</i> Building Self-Checking Digital Devices on the Basis of Modified Hamming Codes with Self-Duality Control for Being Calculated Functions 99

УДК 656.22

ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

КОРНЕВ Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, ведущий инженер; e-mail: da.kornev@gmail.com

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

С целью выбора алгоритма управления локомотивом, при прогнозировании рационального режима движения поезда в эксплуатации методами математического моделирования, выполнен расчет основных технико-экономических характеристик работы тепловоза 2ТЭ116У с составом, при использовании полной мощности и при управлении по параметрам режимной карты. Основой метода является динамическая модель движения поезда на участке железной дороги с заданным профилем. Для верификации разработанного метода численные исследования выполнялись в широком диапазоне изменения весов составов, не превышающих расчетный вес. Выполнено сравнение полученных результатов со статистическими данными о значениях эксплуатационных характеристик движения поездов на сети железных дорог России. Показано, что моделирование режимов движения поезда при использовании полной мощности локомотива дает значительную ошибку при расчете технической скорости, весовой норме поезда и расхода топлива и не позволяет рассчитать рациональный алгоритм управления локомотивом по используемым критериям оптимизации с учетом условий эксплуатации. Обоснована необходимость при выборе рационального алгоритма управления локомотивом учитывать реальные условия эксплуатации движения поездов по пакетному или частично пакетному графику, которые отражены в параметрах режимной карты.

Ключевые слова: динамическая модель движения поезда; верификация модели; алгоритм управления локомотивом; статистические данные эксплуатационных характеристик поездов; график движения поезда; режимная карта движения поезда; расчетные технико-экономические характеристики движения поезда.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-7-18

▼ Введение

Задачи рационального управления движением поезда рассматриваются во многих работах [1–4]. Эти задачи решаются в различных трактовках: при использовании полной мощности локомотива, при управлении по условиям безопасности движения и т. д. Однако в эксплуатации управление движением по любому участку сети железных дорог осуществляется в соответствии с рекомендациями режимной карты, которая предусматривает движение в пакетном или частично пакетном графике, возможности локомотива с точки зрения реализации тяги и безопасность движения по допустимому интервалу времени попутного следования поездов [5]. Исходя из этого, актуальной задачей является исследование процесса управления локомотивом, с определением степени влияния выбранного алгоритма управления на эффективность процесса грузоперевозок и параметры движения поезда.

1. Анализ эксплуатационных характеристик движения поездов

Для повышения эффективности работы железных дорог и использования подвижного состава участковая скорость движения и веса составов поездов должны возрасти. Это обуславливает целесообразность использования локомотивов все большей и большей мощности, несмотря на значительные расходы по их созданию. Особенно остро эта задача встает во время повышения объема перевозок при росте промышленного производства.

Однако зависимости, приведенные на рис. 1, 2, позволяют выявить тенденции в развитии перевозок [6]. В частности, получено, что в течение 22 лет среднестатистическая техническая скорость движения поездов колебалась в очень узком диапазоне 45,6–49,3 км/ч (рис. 1). За этот временной интервал на сети железных дорог появилось новое поколение локомотивов большей мощности, оборудованных



Рис. 1. Среднестатистические значения скоростей поездов на сети железных дорог России за 2001–2021 гг.

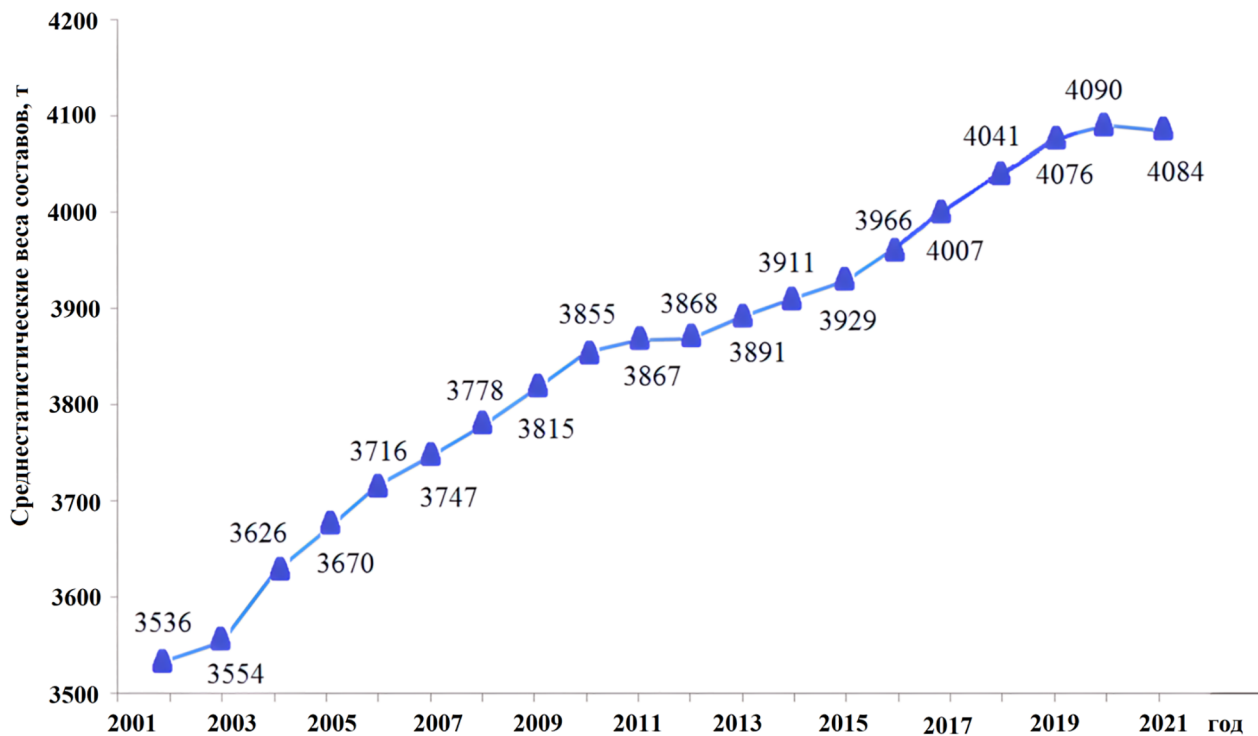


Рис. 2. Среднестатистические значения весов поездов на сети железных дорог России за 2001–2021 гг.

микропроцессорными системами управления с функциями автоведения [7–10]. Получается, технические характеристики локомотивов практически не оказывают влияния на кинематические характеристики движения, т. е. при существующей структуре пути и наличии системы диспетчерской централизации железные дороги работают на пределе пропускной способности.

При этом среднестатистические веса поездов за последние 20 лет неуклонно увеличиваются (рис. 2), что дает возможность от года к году повышать пассажиропоток и грузооборот. Реализуется это за счет возрастания тяговых свойств локомотивов и нагрузок основного энергетического оборудования.

Из сказанного следует, что при выборе рационального алгоритма управления локомотивом

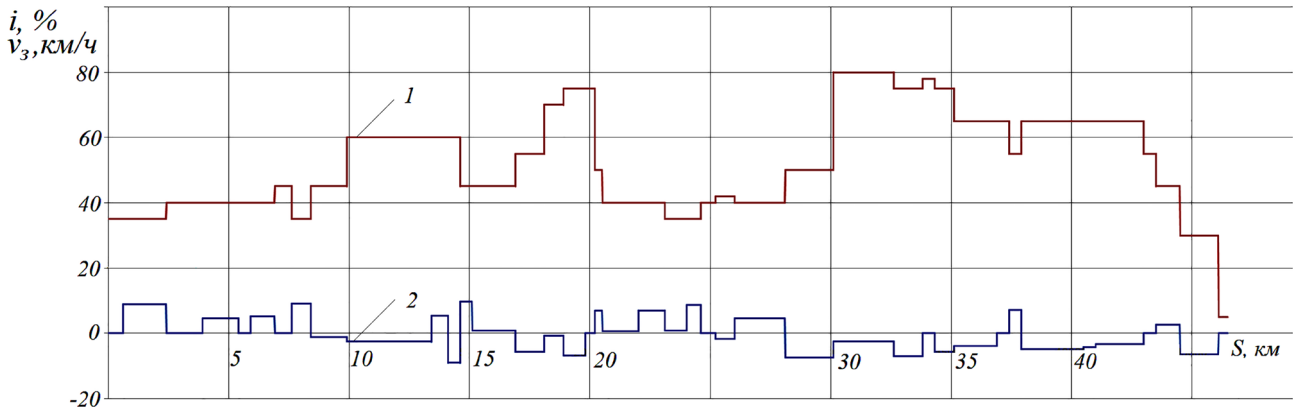


Рис. 3. Параметры режимной карты участка железной дороги:
1 — заданная скорость, v_3 ; 2 — уклон, i

необходимо ввести ограничения, которые учитывают реальные условия эксплуатации поездов на сети железных дорог.

2. Математическая модель движения поезда

С целью выявления ограничений при решении задачи выбора рационального алгоритма управления локомотивом были рассмотрены два крайних варианта управления: управление при полном использовании тяги (именно этот алгоритм положен в основу решения большинства задач по оптимизации управления) и алгоритм управления по параметрам режимной карты. Поскольку график движения поездов является вариативным, т. е. допускающий частичные изменения при сохранении инвариантной основы, в границах управления по

режимной карте могут допускаться отклонения режимов движения, которые будут влиять на эксплуатационные характеристики движения.

Для анализа технических характеристик локомотива при указанных алгоритмах управления был принят участок железной дороги с заданными уклонами и скоростями проследования (рис. 3).

Для принятого к расчету участка расчетный уклон составляет 8,8‰; скоростной уклон — 9‰¹.

Задача управления в настоящее время преимущественно решается для электрической тяги как наиболее распространенной на участках интенсивного движения поездов [11]. Поэтому ниже приведено решение поставленной

¹ Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт. 1985. 287 с.

Таблица 1. Сравнительные характеристики тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ116У

№ п/п	Наименование показателей	Значения показателей	
		2ТЭ116	2ТЭ116У
1	Мощность, кВт (л. с.)	2 · 2250 (2 · 3060)	2 · 2650 (2 · 3604)
2	Номинальная касательная мощность тепловоза длительного режима, кВт (л. с.)	2 · 1700 (2 · 2311)	2 · 2040 (2 · 2755)
3	Служебная масса, т	2 · 138 ±	2 · 139 ±
4	Осевая формула	2(3 ₀ – 3 ₀)	2(3 ₀ – 3 ₀)
5	Конструктивная скорость, км/ч (м/с)	100 (27,8)	100 (27,8)
6	Расчетная сила тяги длительного режима, кН (тс)	2 · 255 (2 · 26)	2 · 323,6 (2 · 33)
7	Скорость длительного режима, км/ч	24 ±	22,9 ±
8	Расчетная сила тяги при трогании с места (с учетом коэффициента использования сцепного веса), кг, не менее кН (тс)	2 · 350 (2 · 35,7)	2 · 403,5 (2 · 41,14)
9	Тип дизель-генератора	1А-9ДГ	18-9ДГ
10	Удельный расход топлива на единицу производительности, кг/10 ⁴ ткм брутто, не более	48,4	28,656

задачи применительно к локомотиву автономной тяги — тепловозу 2ТЭ116У. Тепловоз 2ТЭ116У был создан на базе серийного тепловоза 2ТЭ116, показавшего хорошие характеристики в эксплуатации.

Сравнительные характеристики тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ116У приведены в табл. 1.

Численное решение поставленной задачи выполнялось с использованием динамической модели движения поезда с составами различного веса. В основу модели положено уравнение динамического состояния поезда:

$$(P + Q) \frac{dv}{dt} = F_{\Sigma}, \quad (1)$$

где P и Q — соответственно масса локомотива и состава;

v, t — текущие значения скорости и времени;

F_{Σ} — результирующая сила, действующая на поезд.

При управлении движением поезда локомотив может реализовать три режима:

- тяга;
- выбег;
- торможение.

Выбор режима движения осуществляется машинистом по условиям реальной поездной ситуации и учетом параметров режимной карты.

В соответствии с режимами управления результирующая сила, приведенная в (1), выражается как:

$$F_{\Sigma} = \begin{cases} F_k(v) - W(v, i, R) & \text{на режиме тяги;} \\ W_{xx}(v, i, R) & \text{на режиме выбега;} \\ -B_T(v) - W_{xx}(v, i, R) & \text{на режиме торможения,} \end{cases}$$

где $F_k(v)$ — касательная сила тяги локомотива;

$B_T(v)$ — тормозная сила поезда;

$W(v, i, R)$ — результирующее сопротивление движению поезда на режиме тяги;

$W_{xx}(v, i, R)$ — результирующее сопротивление движению поезда на режиме выбега;

i — уклон на текущем участке профиля;

R — радиус кривой на текущем участке профиля.

Результирующее сопротивление движения поезда в общем случае учитывает сопротивления движения локомотива и состава и

рассчитывается по значениям их удельных сопротивлений. В зависимости от управления меняется сопротивление движения локомотива, так как он может переходить из режима тяги в режимы выбега, в том числе и на режимах торможения (при торможении поездом).

В тяговом режиме результирующее сопротивление движения поезда рассчитывается по зависимости:

$$W(v, i, R) = W'(v, i, R) + W''(v, i, R);$$

в режиме выбега и торможения:

$$W_{xx}(v, i, R) = W'_{xx}(v, i, R) + W''(v, i, R),$$

где $W'(v, i, R)$ и $W'_{xx}(v, i, R)$ — сопротивления движения локомотива на режиме тяги и выбега/торможения;

$W''(v, i, R)$ — сопротивление движения состава.

В соответствии с [11] полные сопротивления движения определяются как:

$$W'(v, i, R) = P \cdot w'(v, i, R);$$

$$W''(v, i, R) = Q \cdot w''(v, i, R);$$

$$W'_{xx}(v, i, R) = P \cdot w'_{xx}(v, i, R),$$

где $w'(v, i, R)$ и $w'_{xx}(v, i, R)$ — удельные сопротивления движения локомотива на режиме тяги и выбега/торможения, т. е. сопротивления, приходящиеся на единицу массы локомотива и состава;

$w'(v, i, R)$ — удельное сопротивление движения состава.

В модели удельные сопротивления движения принимались на основании рекомендаций [11] как результат сложения основного сопротивления движения и дополнительного сопротивления движения:

$$w'(v, i, R) = w'_o(v) + w_{i,r}(i, R);$$

$$w''(v, i, R) = w''_o(v) + w_{i,r}(i, R);$$

$$w'_{xx}(v, i, R) = w'_{o,xx}(v) + w_{i,r}(i, R).$$

Основные сопротивления движения локомотива и состава задавались по экспериментальным зависимостям, приведенным в [11],

в функции от текущей скорости v , измеренной в км/ч:

— для тепловоза 2ТЭ116:

$$w'_0(v) = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2;$$

$$w'_{0,xx}(v) = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2;$$

— для состава, сформированного из четырехосных вагонов на роликовых подшипниках с допустимой нагрузкой на ось $q_0 = 19$ т/ось:

$$w''_0(v) = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_0},$$

где q_0 — нагрузка на ось груженого вагона.

Дополнительное сопротивление учитывает уклон профиля текущего участка движения i [%о] и радиус кривой R [м]:

$$w_{i,r}(i, R) = i + \frac{700}{R}.$$

Тормозная сила, создаваемая поездом, по [4]:

$$B_T(v) = n \cdot 2K \cdot \varphi_K(v),$$

где n — число осей поезда;

$K = 3,8$ т — сила нажатия пневматического тормоза на одну чугунную тормозную колодку в груженом режиме [4];

$\varphi_K(v)$ — коэффициент трения тормозных колодок.

Число осей поезда в модели определялось как:

$$n = \frac{Q}{4q_0}.$$

Для стандартных чугунных колодок действительный коэффициент трения представлен в [11] в функции от скорости v [км/ч] и рассчитывается по зависимости:

$$\varphi_K(v) = \frac{16K + 100}{80K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}.$$

Представленные зависимости были использованы в программе моделирования процесса

движения поезда при указанных алгоритмах управления. Для написания программы был использован язык С++, позволяющий работать с большими массивами данных.

3. Условия моделирования процесса управления тепловозом при движении поезда

При моделировании процесса движения поезда для получения адекватных результатов касательная сила тяги тепловоза 2ТЭ116У по позициям контроллера дизеля задавалась в соответствии с руководством по эксплуатации и правилами тяговых расчетов² с учетом возможности перехода на режим ослабленного возбуждения тяговых электродвигателей в зависимости от текущей скорости движения (рис. 4).

Условием управления предполагалось, что при движении поезда возможно при текущей скорости v реализовать изменение силы тяги путем последовательного перехода на другие позиции контроллера для выполнения условия:

$$v \rightarrow v_3,$$

где v_3 — значение заданной скорости на текущем участке движения в соответствии с параметрами режимной карты [12]. Фактически в модели был реализован реальный алгоритм управления локомотивом — машинист управляет скоростью движения изменением позиции контроллера (пк), а объединенный регулятор дизеля устанавливает частоту вращения коленчатого вала и цикловую подачу топлива, соответствующие данной позиции контроллера.

При моделировании была учтена инерция дизеля. Распоряжение ОАО «РЖД» 31 марта 2010 г. № 671р³ запрещает быстрый набор позиций контроллером дизеля при управлении

² ТЕПЛОВОЗ 2ТЭ116У. Руководство по эксплуатации. Ч. 1. Описание и работа 2ТЭ116.00.00.008-01 РЭ. 2009. 13 с.; Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12 мая 2016 г. № 867р.

³ Распоряжение ОАО «РЖД» от 31 марта 2010 г. № 671р «Об утверждении рекомендаций локомотивной бригаде по обнаружению и устранению неисправностей на локомотивах в пути следования». Данное распоряжение — для всех серий локомотивов.

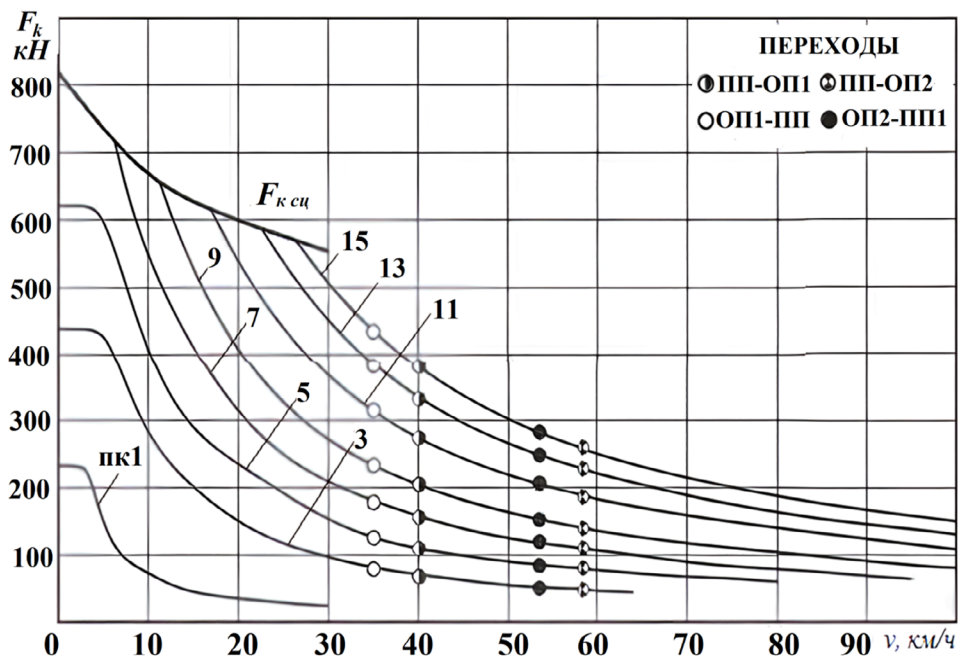


Рис. 4. Изменение силы тяги тепловоза 2ТЭ116У по позициям контроллера дизеля в зависимости от скорости: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 — позиции контроллера; ПП — полное возбуждение тяговых электродвигателей; ОП1, ОП2 — ослабленное возбуждение тяговых электродвигателей первой и второй ступеней

тепловозом. Для высокой эффективности процесса сгорания топлива в цилиндрах дизеля необходимо соответствие воздушного заряда и цикловой подачи топлива. Турбокомпрессор дизеля имеет высокую инерцию и обеспечивает необходимый воздушный заряд в цилиндрах только при установившейся частоте вращения коленчатого вала. Серводвигатель объединенного регулятора частоты вращения дизеля также имеет инерцию. Поэтому высокая скорость набора позиций приводит к несогласованности работы топливной системы и системы газораспределения, химическому и механическому недожогу топлива, закоксуыванию форсунок и повышенному износу цилиндропоршневых групп [13]. На нарушение допустимых эксплуатационных режимов работы дизелей приходится 84 % неисправностей цилиндропоршневой группы и 31 % неисправностей механизма газораспределения. Для того чтобы снизить вероятность возникновения эксплуатационных неисправностей дизеля, набор позиций должен осуществляться с интервалом 3–5 с.

Кроме того, быстрый набор позиций вызывает амплитудные нагрузки в силовом электрооборудовании, тяговом редукторе и, как

следствие, рывкам силы тяги на колесе. Все эти процессы снижают устойчивость сцепления колеса с рельсом, могут вызывать боксование колесных пар, а на высоких скоростях приводят к появлению критического искрения на щетках тяговых электродвигателей и круговому огню по коллектору.

На рис. 5 приведена осциллограмма набора позиций дизелем Д49⁴, которая снималась при его реостатных испытаниях на программный комплекс «БОРТ»⁵. Полученные переходные характеристики позволяют определить инерцию дизеля при переходе с позиции на позицию: среднестатистическая скорость изменения частоты вращения коленчатого вала составляет 0,65 об/с.

Дизель тепловоза работает на его электропривод, инерция которого значительно ниже. В соответствии с алгоритмом управления тяговым электроприводом тепловоза должно непрерывно выполняться условие:

⁴ Дизель Д49 — четырехтактный форсированный дизель с турбокомпрессором.

⁵ Аппаратно-программный комплекс «Борт» предназначен для диагностирования и управления теплотехническим состоянием дизель-генераторных установок.

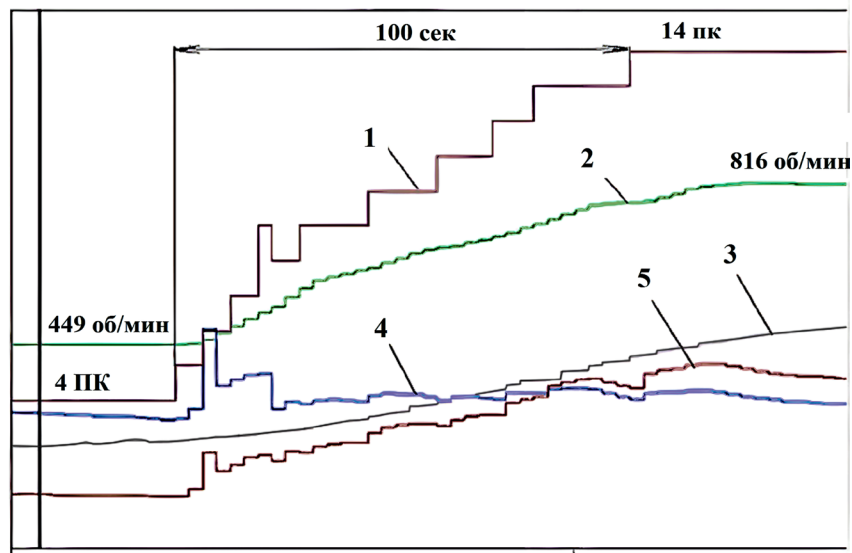


Рис. 5. Осциллограмма процесса изменения параметров режима работы тепловоза при его разгоне, полученная при реостатных испытаниях и зарегистрированная программным комплексом «БОРТ»: 1 — пк; 2 — частота вращения коленчатого вала дизеля; 3 — скорость тепловоза; 4 — ток тягового генератора; 5 — мощность тягового генератора

$$N_{\text{диз}}^{\text{СВ}} = P_{\text{г}},$$

где $N_{\text{диз}}^{\text{СВ}}$ — свободная мощность дизеля, передаваемая на тягу;

$P_{\text{г}}$ — мощность тягового генератора.

Поэтому электропривод должен в каждый текущий момент «подстраиваться» под режимы работы дизеля, в противном случае экономичность работы дизеля будет снижаться. Соответственно, и тяга, развиваемая на колесе тепловоза, в каждый момент времени соответствует свободной мощности дизеля.

Принципом работы объединенного регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля предусмотрено синхронное изменение частоты вращения и цикловой подачи топлива, которые определяют значение индикаторной мощности. Поэтому мощность на валу дизеля изменяется при изменении позиции контроллера машиниста с такой же скоростью, как и частота вращения коленчатого вала, т. е. 0,65 об/с. Эту инерцию работы силовой передачи необходимо было учесть при моделировании динамического процесса формирования силы тяги на колесе тепловоза при его движении с составом по заданному участку железной дороги.

Кроме того, при моделировании движения учитывалось, что на тепловозе происходит

отбор 50 % мощности на привод вспомогательных систем, т. е. $N_{\text{всп}} = 0,5 N_{\text{всп}}^{\text{НОМ}}$, где $N_{\text{всп}}$ — номинальный отбор мощности на привод вспомогательных систем тепловоза.

4. Результаты расчетов технико-экономических показателей движения поездов

При моделировании процесса движения поезда выполнялось главное ограничение условия тяги — скорость локомотива не может на длительный интервал времени снижаться ниже расчетной $v_p = 22,9$ км/ч; в противном случае будут наблюдаться перегрев обмоток тяговых электродвигателей, резкое снижение ресурса их изоляции и преждевременный отказ. Статистические данные по отказу тяговых электродвигателей показывают, что их выход из строя наблюдается уже при выработанном ресурсе менее пятидесяти процентов от рекомендуемого. Причиной тому являются неправильные условия эксплуатации, в частности неверно принятый расчетный вес состава и снижение скорости движения меньше расчетной.

Поскольку моделирование выполнялось для грузового движения, также было учтено, что допустимая скорость для грузовых поездов по сети железных дорог России не должна превышать 80 км/ч, поэтому при достижении поездом

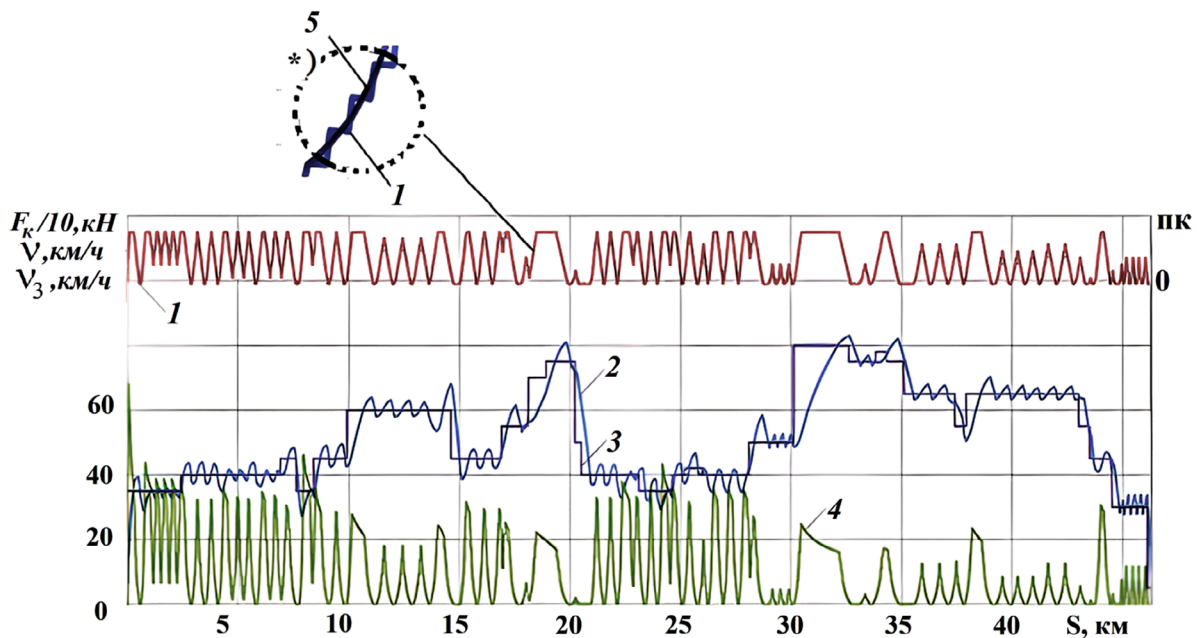


Рис. 6. Моделирование процесса движения поезда с составом расчетного веса $Q_p = 2250$ т в соответствии параметрами режимной карты; *) диаграмма набора позиций контроллером дизеля:
 1 — позиция контроллера дизеля ПК; 2 — текущая скорость движения поезда; v_3 — заданная скорость по параметрам режимной карты v_3 ; 4 — касательная сила тяги тепловоза F_k ; 5 — мощность дизеля

скорости 75 км/ч тепловоз переходил на режим выбега, когда $F_k(v) = 0$, а при скорости 80 км/ч включался пневматический тормоз.

На первом этапе работы с использованием модели были определены значения расчетного веса поезда при двух алгоритмах управления локомотивом:

- движение по параметрам режимной карты, когда возможна реализация режимов управления: тяга во всем диапазоне изменений позиций контроллера (1–15 ПК) выбега; торможения;
- движение с полным использованием мощности, когда возможна реализация режимов: тяга при максимальной мощности (мощности 15-й ПК); выбега; торможения.

Получено, что при движении по участку по параметрам режимной карты вес состава Q составил 2250 т; при движении с полным использованием мощности — $Q_p = 5550$ т. Таким образом, уже на первом этапе была выявлена большая погрешность определения оптимального алгоритма управления локомотивом при моделировании режима движения поезда с полным использованием мощности — более чем двукратное превышение допустимой весовой нормы состава. Это объясняется тем, что

при управлении по режимной карте локомотив должен выполнять пакетный график движения и на расчетном подъеме иметь скорость не 22,9 км/ч (см. табл. 1), а 36 км/ч (рис. 6). Особенно это касается участков железной дороги с интенсивным движением поездов и участков с пассажирским движением, для которых предусмотрен совсем другой скоростной диапазон.

Тем не менее при определении оптимального алгоритма управления чаще всего анализируется режим движения локомотива с использованием полной мощности, так как именно в этом случае возможно в полной мере учесть тяговые свойства локомотива, его экономичность и эффективность использования на сети железных дорог.

Далее, в соответствии с полученными значениями расчетных весов составов выполнялось моделирование процесса движения поезда по заданному участку железной дороги с определением технических характеристик — технической скорости движения, времени хода и расхода топлива дизелем.

Управление по параметрам режимной карты показало, что реализация заданного значения v_3 требует от машиниста практически постоянного изменения позиции контроллера (рис. 6),

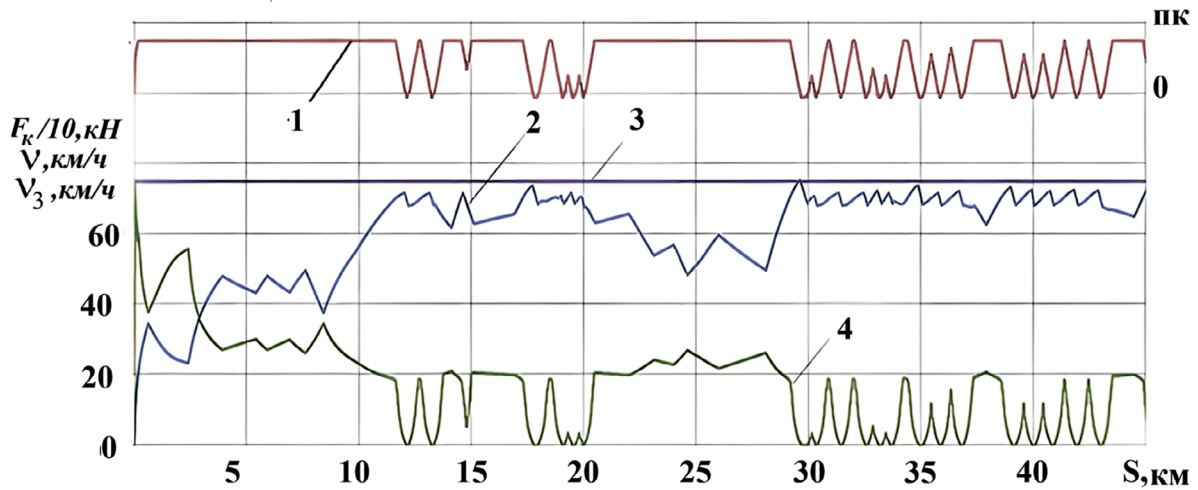


Рис. 7. Моделирование процесса движения поезда с составом расчетного веса $Q_p = 5550$ т при полном использовании мощности:

1 — позиция контроллера дизеля ПК; 2 — текущая скорость движения поезда, v ;
3 — заданная скорость по параметрам режимной карты v_3 ; 4 — касательная сила тяги тепловоза, F_k

т. е. непрерывного контроля за поездной ситуацией. Кроме того, работа дизеля на переходных режимах приводит к ухудшению качества рабочих процессов, снижению его экономических и экологических показателей [14]. В соответствии с текущими позициями контроллера и скоростью касательная сила тяги изменяется в полном диапазоне, достигая максимального значения в момент трогания и на расчетном подъеме. При этом условие $v \rightarrow v_3$ выполняется с хорошей точностью. Даже с учетом того, что уклон участка меняется через каждый километр (рис. 3), ошибка регулирования скорости $(v_3 - v) \leq 5$ км/ч (рис. 6).

При моделировании процесса движения поезда по алгоритму управления локомотивом с полным использованием мощности было получено, что расчетный вес состава $Q_p = 5550$ т позволяет получить максимальную скорость 75 км/ч на отдельных участках следования (рис. 7). Поскольку в этом алгоритме управления заданная скорость имеет единственное значение $v_3 = 75$ км/ч, режимы работы энергетической установки меняются реже, а соответственно, и сила тяги имеет более монотонный характер, что лучше как с точки зрения работы энергетического оборудования, так и с точки зрения процесса управления локомотивом.

На расчетном подъеме, что соответствует алгоритму управления, скорость снижается до

расчетной — 22,9 км/ч, зато на большей части участка движения скорость приближается к заданной.

Сравнение эксплуатационных характеристик работы тепловоза показало, что на заданном участке железной дороги протяженностью 46,5 км при использовании алгоритма управления в соответствии с режимной картой и составом $Q = 2250$ т:

- время хода поезда составило 61 мин.;
- средняя скорость — 45,6 км/ч;
- расход топлива — 428 кг.

При использовании алгоритма управления движение с полной мощностью локомотива и составом $Q_p = 5550$ т:

- время хода поезда составило 50 мин.;
- средняя скорость — 55,8 км/ч;
- расход топлива — 707 кг.

Таким образом, при сравнении технико-экономических характеристик движения поезда при использовании указанных алгоритмов управления получен противоречивый результат исследования:

- 1) движение по режимной карте снижает допустимый вес состава более чем в два раза — с 5550 до 2250 т, что обусловлено разными значениями заданной скорости на расчетном подъеме;
- 2) при более чем двукратном уменьшении веса состава алгоритм управления по режимной карте дает снижение средней

скорости движения всего на 18 % — с 55,8 до 45,6 км/ч и увеличение времени хода с 50 мин. до 61 мин. (на 20,5 %);

- 3) при использовании алгоритма управления по режимной карте расход топлива дизелем снижается на 39 %.

С точки зрения увеличения пропускной способности управление локомотивом по режимной карте является экономически не оправданным — во-первых, более чем в два раза уменьшается вес поезда, т. е. более чем в два раза снижается эффективность перевозочного процесса; во-вторых, ухудшаются эксплуатационные характеристики — время хода и средняя скорость движения. Снижение расхода топлива является вторичным результатом, так как основное назначение железной дороги — организация высокоэффективного перевозочного процесса.

Моделирование процессов движения поезда при разных алгоритмах управления тепловозом 2ТЭ116У позволило рассчитать его технико-экономические характеристики при различных весах поездов.

При движении по режимной карте вес поезда незначительно влияет на среднее значение технической скорости, поскольку в соответствии с алгоритмом управления $v \rightarrow v_3$ (рис. 7). Соответственно, и время движения изменяется незначительно. Расход топлива возрастает с увеличением веса поезда, поскольку увеличиваются затраты мощности на тягу.

Важно отметить, что расчетные значения средней технической скорости движения локомотивом при управлении по параметрам режимной карты соответствуют ее статистическим значениям (рис. 1, 6). Это подтверждает первоначальную гипотезу о том, что в эксплуатации, независимо от того, что железные дороги России оборудованы системой диспетчерской централизации и на локомотивах широко внедряются системы автоведения с возможностью оптимизации управления, в абсолютном большинстве случаев движение поездов вынужденно осуществляется по режимной карте из-за невозможности движения вне графика. Полученное меньшее, чем статистическое, значение веса состава (рис. 2) имеет простое объяснение — все расчеты выполнялись для тепловоза, а на железной дороге России эксплуатируется большое

количество электровозов, которые имеют большую мощность, а соответственно, и тягу.

При использовании алгоритма управления локомотивом движение с полной мощностью с уменьшением веса поезда средняя техническая скорость увеличивается, а время хода и расход топлива дизелем уменьшаются (рис. 8). Полученные при моделировании расчетные значения средней технической скорости отличаются от статистических значений на 20–50 %, а веса составов — на 40 %, при этом графиковое время движения поезда по участку выдержать возможно во всем диапазоне изменения весов поездов.

Полученные результаты позволяют утверждать, что в качестве базового алгоритма управления локомотивом следует принимать алгоритм управления по режимной карте в общем графике движения, а в качестве критериев оптимизации выбирать весовые нормы поездов и затраты энергии на перевозочный процесс. Алгоритмы управления, ориентированные на расчет технических характеристик движения поезда при использовании его номинальной свободной мощности, не соответствуют условиям решения реальной задачи, так как не ориентированы на правила эксплуатации.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что при выполнении тяговых расчетов по алгоритму «движение локомотива с полной мощностью» следует ожидать следующие ошибки при определении технических характеристик движения поезда:

- время хода на 20–30 % ниже среднеэксплуатационного;
- средняя скорость движения на 25–40 % выше среднеэксплуатационной;
- расход топлива дизелем на 60–70 % ниже среднеэксплуатационного.

Заключение

Таким образом, численным исследованием показано, что при использовании алгоритма управления тепловозом движение с полной мощностью, который рекомендован для выполнения тяговых расчетов с целью определения технических характеристик движения поезда — времени хода и средней скорости движения, а также экономичности работы тепловоза — дает значительную ошибку. При этом

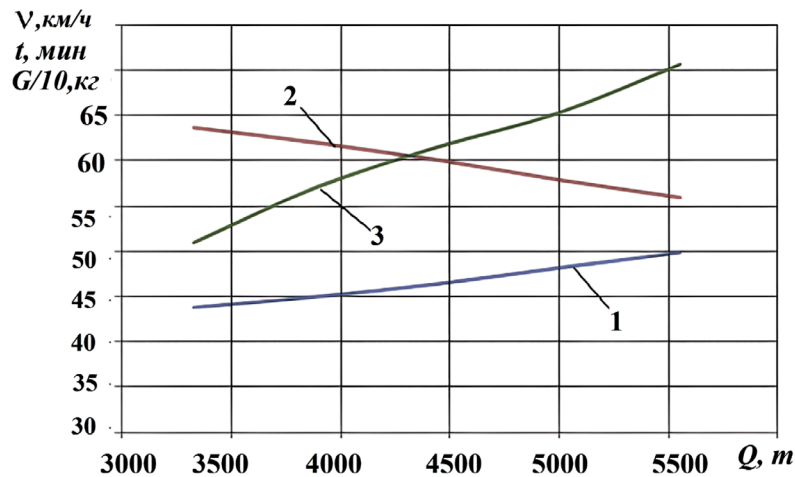


Рис. 8. Изменение технических характеристик движения поезда при алгоритме управления «движение с полной мощностью» и различных весах состава Q :
 1 — время движения по участку; 2 — средняя техническая скорость; 3 — расход топлива дизелем

возможно обеспечить заданное время хода по участку железной дороги в допустимом диапазоне весов поездов, включая расчетный вес. Однако этот алгоритм не позволяет обеспечить заданную скорость на расчетном подъеме при расчетном весе состава, что при плотном графике движения поездов приведет к его сбою или снизит показатели безопасности движения за счет сокращения интервального времени. Реальные результаты выбора рациональных параметров движения можно получить только в том случае, если алгоритм управления приближен к фактическим условиям движения, т. е. использует параметры режимных карт. Поэтому важным направлением перспективных исследований является поиск оптимальных алгоритмов управления подвижным составом в графиковом расписании с учетом поездной ситуации. Реализация такого алгоритма на базе микропроцессорной системы автоведения локомотива позволит управлять движением по любым критериям оптимизации с максимальной эффективностью работы железнодорожного транспорта. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
2. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябко // Железнодорожный транспорт. — 2010. — № 2. — С. 24–29.

3. Баранов Л. А. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Надежность. — 2021. — № 2. — С. 17–23. — DOI: doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
4. Su R. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm / R. Su, Q. Gu, T. Wen // Journal of Applied Mathematics. — Vol. 2014. — DOI: doi.org/10.1155/2014/507308. — URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/507308/.
5. Liu P. Optimizing the train timetable with consideration of different kinds of headway time / P. Liu, B. Han // Journal of Algorithms & Computational Technology. — 2017. — Vol. 11(2). — Pp. 148–162. — DOI: doi.org/10.1177/1748301816689685.
6. Железнодорожные перевозки и инфраструктура. — URL: https://ar2001.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure (дата обращения: 14.12.2022).
7. Coxon M. Alstom to deliver Train Control System for KiwiRail in New Zealand. 14 September 2022. — URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/9/alstom-deliver-train-control-system-kiwirail-new-zealand (accessed: December 14, 2022).
8. Lina B. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm / B. Lina, Y. Zhaoa, R. Linb et al. // Applied Mathematical Modelling. May 2021. — Vol. 93. — Pp. 811–830. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X20307381 (accessed: December 14, 2022).
9. Новиков В. Г. Микропроцессорные системы управления движением поездов в московском метрополитене / В. Г. Новиков, А. С. Сафронов, В. В. Кузюков // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 268–288. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293.

10. Satoru I. Latest Train Control and Management System Technologies for Improving Safety and Maintainability / I. Satoru, S. Takayuki, S. Keishi et al. // Hitachi Review. — 2018. — Vol. 67. — Iss. 7. — Pp. 52–58.
11. Urbaniak M. Optimization of Train Energy Cooperation Using Scheduled Service Time Reserve / M. Urbaniak, E. Kardas-Cinal // Energie. — 2022. — Vol. 15.
12. Sovicka P. Improved train simulation with speed control algorithm / P. Sovicka, M. Pacha, P. Rafajdus et al. // Trans-

- portation Research Procedia. — 2019 — Vol. 40. — Pp. 1563–1570.
13. Коньков А. Ю. Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, А. Д. Гурьянова // Вестник ВНИИЖТ. — 2021. — Т. 80. — № 1. — С. 20–29. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29.
14. Морозов О. В. Влияние эксплуатационных факторов на режимы работы тепловозов / О. В. Морозов, А. Г. Силюта, Е. П. Филиппов. — 2022.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 7–18
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-7-18

Influence of Control Algorithm on Train Traffic Technical Characteristics

Information about author

Kornev D. A., PhD in Engineering, Lead Engineer. E-mail: da.kornev@gmail.com

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

Abstract: In order to choose locomotive control algorithm when prognosing train motion rational mode in an exploitation by the methods of mathematical modeling, the calculation was performed of main technical and economic characteristics of the operation of diesel locomotive ZTE116U with a stock at the use of full power and at control, basing on the parameters of a mode map. The method basis represents train motion dynamic model on a railway section with a given profile. To verify the developed method, numerical studies were carried out in the wide range of changes of stock weights which not exceed the calculated weight. The obtained results have been compared with statistical data on the values of operational characteristics of train motion on Russia railways. It has been shown that train motion mode modelling at the use of locomotive full power gives a significant error at calculating technical speed, at the norm of train weight rate and fuel consumption and does not allow calculating locomotive control rational algorithm on optimization used criteria inclusive of operation conditions. At the choice of locomotive control rational algorithm, the necessity is substantiated for taking into account real conditions of train motion operation by batch or partially batch schedule which are reflected in mode map parameters.

Keywords: dynamic model of train motion; model verification; locomotive control algorithm; statistical data of train operational characteristics; train schedule; train motion mode map; calculated technical and economic characteristics of train motion.

References

1. Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V. et al. Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya podvizhnogo sostava [Microprocessor systems for automatic guidance of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1990, 272 p. (In Russian)
2. Muginshtein L. A., Vinogradov S. A., Yabko I. A. et al. Energooptimal'nyy tyagovyy raschet dvizheniya poyezdov [Energy-optimal traction calculation of the movement of trains]. Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]. 2010, vol. 2, pp. 24–29. (In Russian)
3. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Intellektual'noye tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensivnogo dvizheniya [Intelligent centralized traffic control of off-street urban railway transport in conditions of heavy traffic]. Nadezhnost'

[Reliability]. 2021, vol. 2, pp. 17–23. DOI: doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23. (In Russian)

4. Su R., Gu Q., Wen T. et al. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm. Journal of Applied Mathematics, vol, 2014. DOI: doi.org/10.1155/2014/507308. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/507308/>.
5. Liu P., Han B. Optimizing the train timetable with consideration of different kinds of headway time. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2017, vol. 11(2), pp. 148–162. DOI: 10.1177/1748301816689685.
6. Zheleznodorozhnye perevozki i infrastruktura [Railway transportation and infrastructure]. Available at: <https://ar2001.rzd.ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure> (accessed: December 14, 2022). (In Russian)
7. Coxon M. Alstom to deliver Train Control System for KiwiRail in New Zealand. 14 September 2022. Available at: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/9/alstom-deliver-train-control-system-kiwirail-new-zealand> (accessed: December 14, 2022).
8. Lina B., Zhaoa Y., Linb R. et al. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. Applied Mathematical Modelling. May 2021, vol. 93, pp. 811–830. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X20307381> (accessed: December 14, 2022).
9. Novikov V. G., Safronov A. S., Kuzukov V. V. Mikroprotsessornyye sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov v moskovskom metropolitene [Microprocessor control systems for train traffic in the Moscow metro]. Avtomatika na transporte [Transport automation research]. 2020, vol. 6, iss. 3, pp. 268–288. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293. (In Russian)
10. Satoru I., Takayuki S., Keishi S. et al. Latest Train Control and Management System Technologies for Improving Safety and Maintainability. Hitachi Review. 2018, vol. 67, iss. 7, pp. 52–58.
11. Urbaniak M., Kardas-Cinal E. Optimization of Train Energy Cooperation Using Scheduled Service Time Reserve. Energie. 2022, vol. 15. DOI: doi.org/10.3390/en15010119.
12. Sovicka P., Rafajdus P., Varecha P. et al. Improved train simulation with speed control algorithm. Transportation Research Procedia. 2019, vol. 40, pp. 1563–1570.
13. Konkov A. Yu., Trunov A. I., Gurianova A. D. Metod regulirovki toplivnoy apparatury teplovoznogo dizelya po kharakteristike teplovyydeniya v usloviyakh ekspluatatsii [A method for adjusting the fuel equipment of a diesel locomotive according to the characteristics of heat release under operating conditions]. Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Bulletin]. 2021, vol. 80, iss. 1, pp. 20–29. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29. (In Russian)
14. Morozov O. V., Silyuta A. G., Filippov E. P. Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na rezhimy raboty teplovozov [The Influence of Operational Factors on the Operating Modes of Diesel Locomotives]. 2022. (In Russian)

АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫПОЛНЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ ПО ПРОВЕРКЕ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ НА ШУНТОВУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

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

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

В статье рассмотрены вопросы практического применения подхода к автоматизации выполнения и планирования работ по техническому обслуживанию устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в процессе реализации планово-предупредительного технического обслуживания, включая анализ известных способов автоматизации проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность и автоматизации контроля выполнения шунтового эффекта в процессе нахождения подвижной единицы на рельсовой цепи. В настоящее время актуальной является задача сокращения трудозатрат на техническое обслуживание рассредоточенных объектов автоматики и телемеханики, для решения которой предлагается использовать алгоритмы, обеспечивающие идентификацию технологических ситуаций и определение множества работ, которые будут считаться выполненными автоматически, а также множества работ, которые требуется выполнить в установленные сроки. Суть предлагаемого подхода к автоматизации рассматриваемых процессов состоит в следующем: если в процессе функционирования рельсовой цепи в штатном режиме реализуется ситуация, аналогичная процессу выполнения работы по проверке шунтовой чувствительности (предусмотренная технологией выполнения работы), то при наличии средств достоверного контроля значений параметров рельсовой цепи работа считается выполненной.

Ключевые слова: рельсовые цепи; техническое обслуживание; автоматизация технического обслуживания; шунтовая чувствительность рельсовой цепи; техническое диагностирование и мониторинг.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32

▼ Введение

Обеспечение шунтового эффекта при вступлении подвижной единицы на участок железнодорожного пути, оборудованный рельсовой цепью, зависит от правильной регулировки рельсовой цепи и ее шунтовой чувствительности. Неправильная регулировка — установка напряжения источника питания рельсовой цепи выше предельного значения, указанного в регулировочной таблице, является результатом предумышленных действий эксплуатационного персонала и приводит к ложной свободности участка. Последствиями могут быть перевод стрелки под составом или открытие светофора, ограждающего данный участок, что приводит к крушениям поездов. При наличии средств технического диагностирования и мониторинга такое нарушение норм содержания рельсовых цепей выявляется практически

сразу путем измерения в непрерывном режиме напряжений на выходах источников питания и входах приемников рельсовых цепей.

Шунтовая чувствительность рельсовой цепи определяется значением сопротивления поездного шунта, которое складывается из сопротивления колесных пар подвижного состава и переходного сопротивления «колесо — рельс» [1]. Значение сопротивления поездного шунта зависит от количества осей, шунтирующих рельсовую цепь, скорости движения подвижной единицы, состояния поверхностей головок рельсов и поверхностей колес по кругу катания.

Исследования, результаты которых представлены в [2–4], показали, что сопротивление поездного шунта не зависит от сопротивления колесной пары (на значение электрического сопротивления колесной пары не влияют срок службы, пробег, количество ремонтов),

а определяется наличием или отсутствием непроводящего слоя в месте контакта колеса и рельса. Исследования, результаты которых представлены в [5], также подтверждают, что сопротивление колесной пары намного меньше, чем сопротивление контакта колеса с рельсом, и увеличение сопротивления поездного шунта, если таковое происходит, вызвано увеличением сопротивления в месте контакта колеса с рельсом.

Действующая организация выполнения работ (планово-предупредительное техническое обслуживание с периодическим контролем) и технология проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность существенно зависят от влияния так называемого человеческого фактора на результат и, как следствие, на уровень безопасности движения поездов.

Целью статьи является разработка предложений по применению рассмотренного в [6] метода для планирования работ по проверке станционных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность на основе цифровой модели непрерывного мониторинга и обновления информации о фактически реализованных технологических ситуациях, эквивалентных имитации функционирования обслуживаемых устройств в различных режимах.

1. Актуальность автоматизации процессов выполнения и планирования работ по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность

В соответствии с действующей технологией¹ работы по проверке станционных двухниточных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность выполняются в свободное от движения поездов время (в промежутках между поездами) или технологическое «окно» следующим образом: шунт сопротивлением 0,06 Ом накладывается на поверхность головок рельсов на питающем конце, на всех релейных концах, а также на ответвлениях, не контролируемых путевыми

реле (приемниками); при каждом наложении шунта индикация на аппарате управления дежурного по станции должна соответствовать занятому состоянию рельсовой цепи, а путевые реле должны находиться в состоянии «без тока». Работа выполняется двумя непосредственными исполнителями — электромехаником и электромонтером по обслуживанию и ремонту устройств сигнализации, централизации и блокировки 5-го разряда с задействованием дежурного по железнодорожной станции для контроля индикации о состоянии рельсовых цепей. Периодичность выполнения работ для рельсовых цепей, параллельные ответвления которых не контролируются путевыми реле, — один раз в две недели, для остальных рельсовых цепей — один раз в четыре недели.

Работы по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность, как и другие работы, требующие переходов эксплуатационного персонала между рассредоточенными по станции объектами, являются весьма ресурсозатратными [7], в том числе и с точки зрения непроизводительных затрат времени. Общее время выполнения работ в пределах станции зависит от количества рельсовых цепей и длин контролируемых участков, а также от допустимых маршрутов передвижения по станции эксплуатационного персонала. Сокращение потерь времени при техническом обслуживании рельсовых цепей является одной из задач в рамках общей тенденции к сокращению (оптимизации) ресурсов, выделяемых на техническую эксплуатацию объектов инфраструктуры [8, 9].

Вопросы повышения надежности обеспечения шунтового эффекта, в том числе и за счет сведения к минимуму влияния так называемого человеческого фактора на организацию и качество выполнения работ и принятия решений, рассматривались ведущими учеными и специалистами в области железнодорожной автоматики, телемеханики и локомотивного хозяйства. Известные в настоящее время результаты исследований по этой тематике можно систематизировать по четырем направлениям: 1) автоматизация проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность; 2) автоматизация контроля выполнения шунтового эффекта в процессе нахождения подвижной

¹ Технично-нормировочная карта № ТНК ЦШ 0178-2015. Электрические рельсовые цепи. Проверка станционных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность; утв. Управлением автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» 8 октября 2015 г. — М.: ОАО «РЖД», 2015. — 6 с.

единицы на рельсовой цепи; 3) автоматизация измерения сопротивления поездного шунта; 4) способы предотвращения потери шунта (невыполнения шунтового эффекта) занятой рельсовой цепью. В настоящей статье рассмотрим первые два направления исследований.

1. Известные предложения по автоматизации проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность сводятся к замене наложения на рельсы нормативного шунта шунтированием тракта протекания сигнального тока в других точках с целью сокращения времени выполнения работ.

Так, для проверки на шунтовую чувствительность в автоматическом режиме в [10] предложено в состав аппаратуры рельсовой цепи дополнительно включать два блока: блок шунтирования, который поочередно шунтирует цепь питающего конца сопротивлениями, эквивалентными наложению нормативного шунта в начале и в конце рельсовой линии; блок управления и индикации, который выдает управляющие сигналы блоку шунтирования и, проверяя реакцию путевого реле на наложение шунта, формирует сигнал о состоянии (исправном или неисправном) рельсовой цепи. В [11, 12] для реализации этого же технологического процесса предложено использовать два блока шунтирования, один из которых включается на питающем конце (между передающей аппаратурой и рельсовой линией), второй — на релейном конце (между приемной аппаратурой и рельсовой линией) рельсовой цепи. Способ автоматической проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность путем шунтирования на кроссовых стативах линий питающего и релейного концов имеет ряд недостатков, основным из которых является возникновение ложной занятости рельсовой цепи из-за неисправности дополнительной аппаратуры. Кроме того, обесточивание путевого реле при шунтировании постовой цепи питающего или релейного конца не гарантирует, что путевое реле также обесточится при шунтировании рельсовой линии колесной парой, например, в случае увеличения переходного сопротивления «колесо — рельс».

2. В основу известных предложений по автоматизации контроля выполнения шунтового

эффекта в процессе нахождения подвижной единицы на рельсовой цепи положены алгоритмы функционирования автоматической локомотивной сигнализации (АЛС).

Для выявления потери шунта под подвижной единицей, которая может произойти в случае применения экстренного торможения с использованием песка, в [13] предложено после включения режима торможения переключать локомотивные устройства АЛС на прием кодовых сигналов от задних (по ходу движения) приемных катушек. Если при этом показание локомотивного светофора не изменяется, то это означает, что колесные пары подвижной единицы не шунтируют рельсовую цепь. Недостатком такого способа является необходимость переключения устройств АЛС вручную, то есть возложение дополнительных функций на машинистов.

С целью автоматизации контроля в [14], в отличие от [13], предложено дополнить локомотивные устройства АЛС аппаратурой сравнения сигналов, воспринимаемых в непрерывном режиме передними и задними приемными катушками. Решение о выполнении шунтового эффекта принимается по следующим логическим правилам: 1) если кодовые сигналы воспринимаются только передними приемными катушками, то подвижная единица шунтирует рельсовую цепь; 2) если кодовые сигналы воспринимаются и передними, и задними приемными катушками, то подвижная единица не шунтирует рельсовую цепь; 3) если кодовые сигналы воспринимаются только задними приемными катушками, подвижная единица шунтирует рельсовую цепь, а кодирование участка осуществляется «в хвост» подвижной единицы.

Для исключения ошибки при принятии решения — выдачи ложной информации о потере шунта в момент прохода подвижной единицы через изолирующий стык, разделяющий рельсовые цепи, кодируемые разными кодами, в [15] предложено сравнение сигналов, воспринимаемых передними и задними приемными катушками, проводить с некоторой задержкой во времени. Также с целью исключения ошибки при принятии решения, но в случае нахождения подвижной единицы на участке, кодируемом в обоих направлениях,

в [16] предложено реализовать в аппаратуре сравнения сигналов, воспринимаемых передними и задними приемными катушками, функцию распознавания типа кодового путевого трансмиттера (по длительности кодового цикла).

Рассмотренный способ во всех вариациях имеет ограниченное применение — только для одиночного локомотива или двухкабинного специального самоходного подвижного состава. Другой недостаток — не выявляется потеря шунта при движении по некодируемому участку или при сбоях в работе устройств кодирования рельсовых цепей, так как контроль основан на реализации алгоритмов функционирования АЛС (прием кодовых сигналов на частоте кодового тока АЛС).

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Известные предложения по автоматизации проверки на шунтовую чувствительность предполагают использование дополнительной коммутирующей аппаратуры, что может привести к снижению надежности рельсовых цепей и потребовать перерасчета регулировочных таблиц, а также исключают наложение нормативного шунта непосредственно на рельсовую линию, что противоречит действующей технологии выполнения соответствующей работы.

2. Известные методы автоматизации контроля выполнения шунтового эффекта в процессе нахождения подвижной единицы на рельсовой цепи на основе аппаратуры и алгоритмов функционирования автоматической локомотивной сигнализации применимы только для одиночных двухкабинных подвижных единиц и для реализации требуют существенного усложнения существующих аппаратных средств и программно-алгоритмического обеспечения.

3. Перспективными с точки зрения сокращения трудозатрат на выполнение работ по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность можно считать технические, технологические и алгоритмические решения, реализация которых: не требует внесения изменений в существующие схемы рельсовых цепей или устройств АЛС (АЛСН, КЛУБ и др.); основана на контроле параметров рельсовых цепей в процессе работы в штатном

режиме; предполагает использование типовой аппаратуры известных систем технического диагностирования и мониторинга или соответствующих подсистем микропроцессорных (релейно-процессорных) централизаций.

2. Алгоритм определения рельсовых цепей, для которых проверку на шунтовую чувствительность можно считать выполненной в автоматическом режиме

Суть предлагаемого подхода к минимизации ресурсозатрат (затрат времени) в следующем: если в процессе функционирования рельсовой цепи в штатном режиме реализуется ситуация, аналогичная процессу выполнения работы по проверке шунтовой чувствительности (предусмотренная технологией выполнения работы), то при наличии средств достоверного контроля значений параметров рельсовой цепи работа считается выполненной. Реакция исправной и правильно отрегулированной рельсовой цепи на наложение нормативного шунта сопротивлением 0,06 Ом эквивалентна реакции на наложение поездного шунта. Поэтому можно сделать следующий вывод: если на рельсовую цепь был наложен поездной шунт (по рельсовой цепи проследовала подвижная единица) и при этом достоверно зафиксировано состояние рельсовой цепи «занятое», то проверку шунтовой чувствительности вручную можно не проводить (можно считать, что проверка выполнена).

Для ситуации «наложение нормативного шунта на конец рельсовой цепи» выбор эквивалентной технологической ситуации из двух — «вступление первой колесной пары подвижной единицы на конец рельсовой цепи» или «нахождение на конце рельсовой цепи последней колесной пары подвижной единицы» — производим исходя из следующих соображений: по технологии выполнения работы нормативный шунт накладывается на свободную рельсовую цепь, то есть фиксируется срабатывание рельсовой цепи при ее занятии, что соответствует первому варианту; второй вариант соответствует проверке фиксации занятого состояния рельсовой цепи в момент, когда она уже занята, то есть проверяется отсутствие так называемой потери шунта у занятой рельсовой цепи.

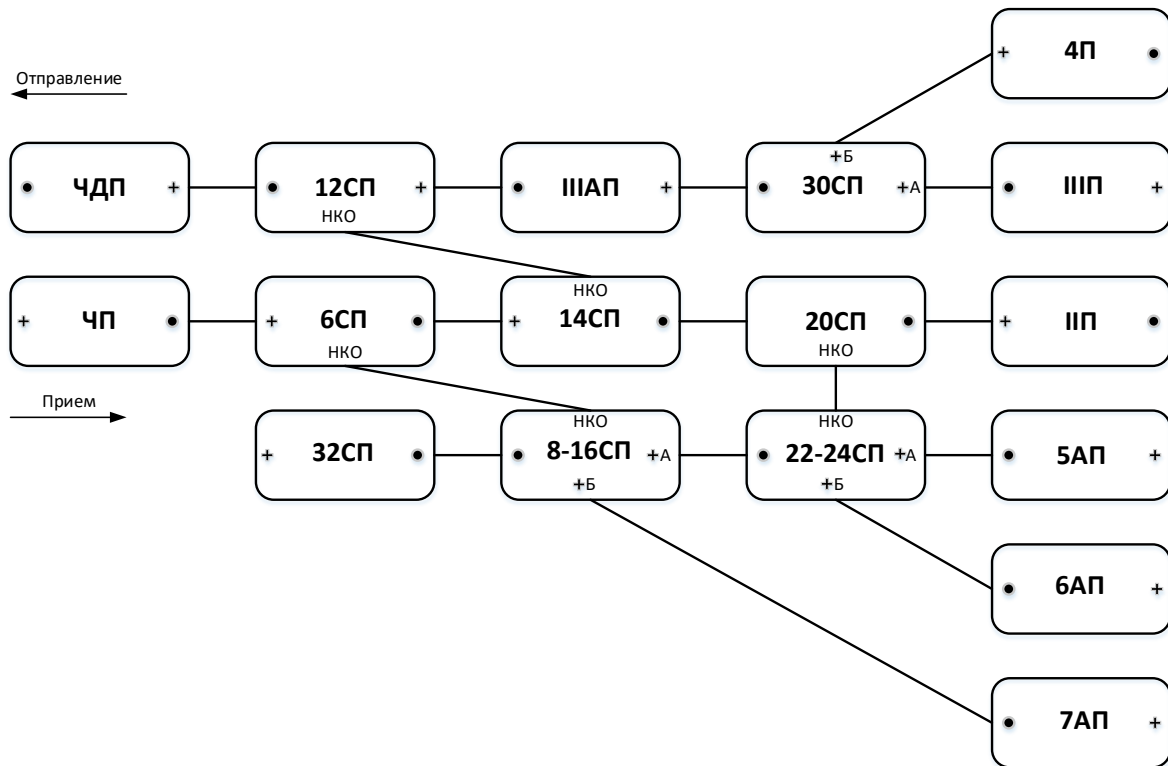


Рис. 1. Граф фрагмента горловины станции

Особенность учета реализованных маршрутов и задействованных при этом рельсовых цепей состоит в том, что необходимо учитывать направление движения подвижной единицы для определения места наложения поездного шунта на рельсовую цепь (одного из концов рельсовой цепи — питающий или релейный конец, неконтролируемое ответвление). Введем ряд определений в соответствии с терминологией, принятой в [7], и рассмотрим примеры их использования для фрагмента горловины станции, представленной на рис. 1 в виде графа, вершинами которого являются рельсовые цепи (ЧДП, 12СП, 3АП и др.). Обозначения концов рельсовых цепей на рис. 1 следующие: «+» и «●» — соответственно релейный и питающий конец; НКО — неконтролируемое ответвление.

Определение 1. «Работа» — проверка рельсовой цепи на шунтовую чувствительность.

В соответствии с рис. 1 множество возможных работ содержит следующие элементы: {(проверка ЧДП на при наложении шунта на питающий конец), (проверка ЧДП при наложении шунта на релейный конец), (проверка 12СП на при наложении шунта на питающий конец), (проверка 12СП при наложении шунта

на релейный конец), (проверка 12СП при наложении шунта на неконтролируемое ответвление), ..., (проверка 7АП на при наложении шунта на питающий конец), (проверка 7АП при наложении шунта на релейный конец)}.

Определение 2. «Событие» — наложение поездного шунта на конец рельсовой цепи.

В соответствии с рис. 1 множество возможных событий содержит следующие элементы: {(наложение поездного шунта на питающий конец ЧДП), (наложение поездного шунта на релейный конец ЧДП), (наложение поездного шунта на питающий конец 12СП), (наложение поездного шунта на релейный конец 12СП), (наложение поездного шунта на неконтролируемое ответвление 12СП), ..., (наложение поездного шунта на питающий конец 7АП)}.

Определение 3. «Действие» — реализация поездного или маневрового маршрута на станции.

В соответствии с рис. 1 множество возможных действий содержит следующие элементы: {(маршрут приема с ЧП на 3АП), (маршрут приема с ЧП на 5АП), (маршрут приема с ЧП на 6АП), (маршрут приема с ЧП на 7АП), (маршрут приема с ЧДП на 3АП), (маршрут приема с ЧДП на 4П), (маршрут приема с ЧДП на 3АП),

(маршрут приема с ЧДП на 5АП), (маршрут приема с ЧДП на 6АП), (маршрут отправления с ИПП на ЧДП), (маршрут отправления с 4П на ЧДП), (маршрут отправления с ИПП на ЧДП), (маршрут отправления с 5АП на ЧДП), (маршрут отправления с 6АП на ЧДП), (маршрут отправления с ИПП на ЧП), (маршрут отправления с 5АП на ЧП), (маршрут отправления с 6АП на ЧП), (маршрут отправления с 7АП на ЧП)}.

В соответствии с алгоритмами функционирования систем централизации стрелок и светофоров каждое действие (маршрут) состоит из упорядоченного набора событий, при этом последовательность событий определяется последовательностью вступления подвижной единицы на рельсовые цепи (их соответствующие концы), входящие в маршрут. Таким образом, события являются элементами действий.

Алгоритм принятия решений о выполнении работ содержит шесть продукционных правил, что обеспечивает относительную простоту его реализации.

Правило 1. ЕСЛИ событие произошло И реакция рельсовой цепи соответствует нормативной (путевое реле перешло в состояние «выключено» И значение остаточного напряжения не превышает установленный предел), ТО работа выполнена.

Правило 2. ЕСЛИ действие совершилось, ТО произошли все события, являющиеся его элементами.

Правило 3 (следствие правила 2). ЕСЛИ совершено действие, элементом которого является какое-либо событие, ТО это событие произошло.

Правило 4. ЕСЛИ (маршрут был установлен И (не было отмены ИЛИ искусственной разделки маршрута после того, как маршрут был установлен) И подвижная единица проследовала по маршруту после того, как маршрут был установлен И произошло автоматическое размыкание маршрута после того, как подвижная единица проследовала по маршруту), ТО маршрут реализован.

Правило 5. ЕСЛИ (маршрут был задан (набран на аппарате управления) И светофор, определяющий начало маршрута, был открыт после того, как маршрут был задан), ТО маршрут был установлен.

Правило 6. ЕСЛИ (логическая последовательность занятия и освобождения рельсовых цепей по маршруту не была нарушена И характер изменения уровня напряжения на входе путевого приемника (путевого реле) рельсовой цепи соответствует эталонному для смены состояний «занятое/свободное» или «свободное/занятое»), ТО подвижная единица проследовала по маршруту.

Последнее условие подразумевает следующее: если путевое реле в состоянии «включено», то напряжение должно быть в пределах, установленных в регулировочной таблице; если путевое реле в состоянии «выключено», то напряжение должно быть не выше установленного порогового уровня.

Логическая схема принятия решения «маршрут реализован» показана на рис. 2, где использованы следующие обозначения: 4, 5, 6 — номера продукционных правил, реализуемых соответствующим элементом; $t >$ — логическая операция сравнения моментов времени выполнения условий, на выходе элемента сигнал «1», если соответствующее условие выполняется (если условие по нижнему входу выполнено позже, чем по верхнему); МЗ — маршрут задан; СВ — светофор открыт; ОТ — отмена маршрута; РИ — искусственная разделка маршрута; ПЗ/ПО — последовательное занятие/последовательное освобождение рельсовых цепей; $U/U_{\text{ОСТ}}$ — напряжение/остаточное напряжение; ПЕ→ — подвижная единица проследовала по маршруту; Р — автоматическое размыкание маршрута; МР — маршрут реализован.

Последовательность занятия и освобождения рельсовых цепей по маршруту определяется с учетом того, на какой конец (ответвление) был наложен поездной шунт, по следующему алгоритму:

Шаг 1. Определяется (проверяется) последовательность занятия/освобождения рельсовых цепей по маршруту способом, который реализуется в конкретной системе централизации на станции, и проверяется соответствие последовательности заданному (установленному) маршруту.

Шаг 2. Определяются (проверяются) концы рельсовых цепей, на которые был наложен поездной шунт.

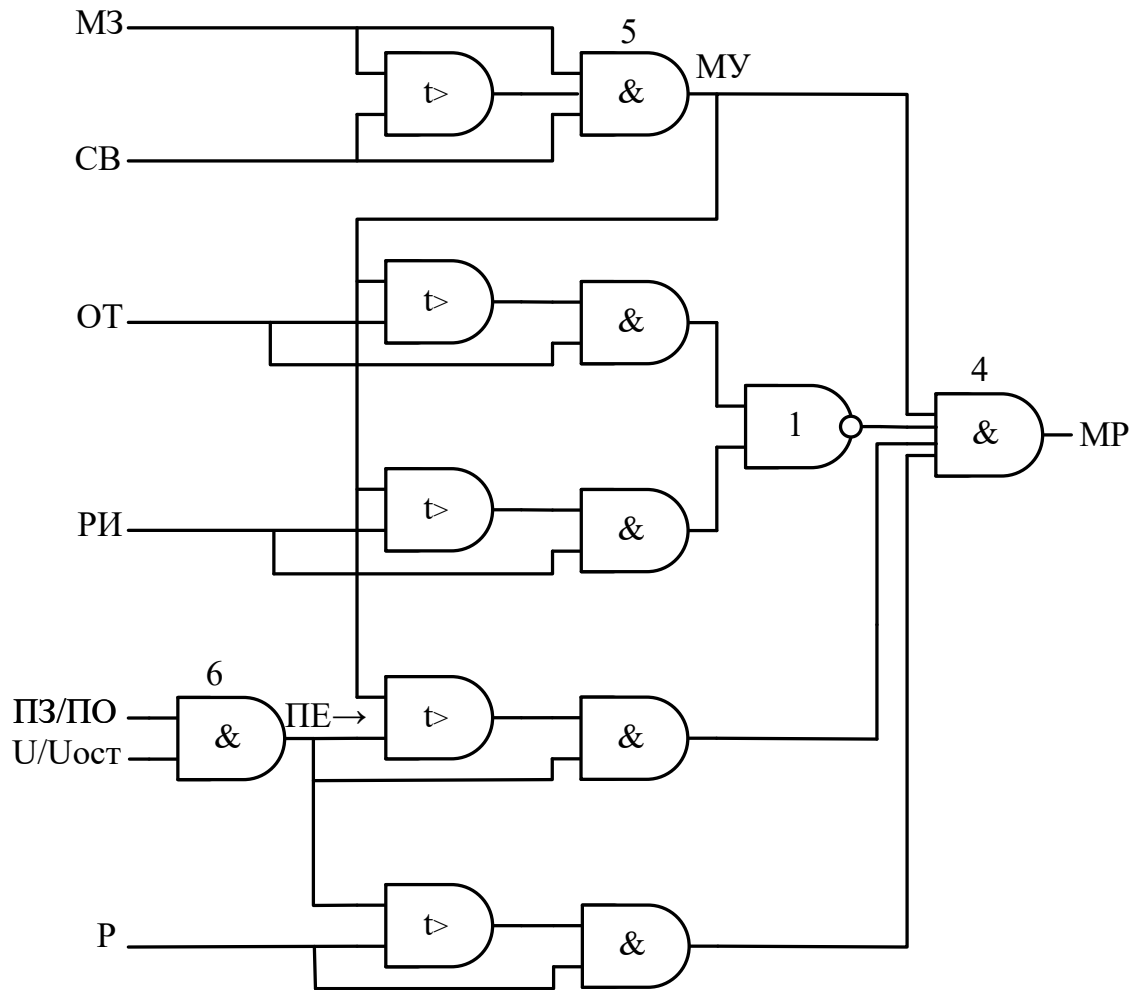


Рис. 2. Логическая схема принятия решения «маршрут реализован»

На шаге 1 используется один из известных способов контроля правильной последовательности занятия/освобождения рельсовых цепей в маршруте — контроль последовательности срабатывания путевых реле трех последовательно расположенных рельсовых цепей по трассе маршрута (в системах микропроцессорной и релейно-процессорной централизации) или контроль последовательности срабатывания маршрутных реле данной секции (в блочных и неблочных системах релейной централизации).

На шаге 2 используются продукционные правила, составленные с учетом количества путевых реле и наличия неконтролируемых ответвлений в схеме рельсовой цепи.

Правила принятия решений для разветвленной рельсовой цепи (несколько путевых реле):

ЕСЛИ все путевые реле в состоянии «выключено», ТО определить место наложения

поездного шунта следует в соответствии с установленным маршрутом.

ЕСЛИ одно путевое реле в состоянии «выключено», ТО поездной шунт наложен на соответствующий релейный конец.

ЕСЛИ (в состоянии «выключено» более одного путевых реле И одно из них соответствует релейному концу в установленном маршруте), ТО поездной шунт наложен на соответствующий релейный конец.

ЕСЛИ (хотя бы одно путевое реле в состоянии «выключено» И в соответствии с установленным маршрутом подвижная единица должна вступить на неконтролируемое ответвление), ТО поездной шунт наложен на соответствующее неконтролируемое ответвление.

Правила принятия решений для неразветвленной рельсовой цепи (с одним путевым реле):

ЕСЛИ (путевое реле в состоянии «выключено» И в соответствии с установленным

Таблица 1. **Определение конца рельсовой цепи, на который наложен поездной шунт (рельсовая цепь с двумя путевыми реле)**

Состояние путевых реле		Реализованный маршрут		
А	Б	$M_{ПК}$	$M_{РКА}$	$M_{РКБ}$
1	1			
0	1		$ПШ_{РКА}$	
1	0			$ПШ_{РКБ}$
0	0	$ПШ_{ПК}$	$ПШ_{РКА}$	$ПШ_{РКБ}$

Таблица 2. **Определение конца рельсовой цепи, на который наложен поездной шунт (рельсовая цепь с двумя путевыми реле и неконтролируемым ответвлением)**

Состояние путевых реле		Реализованный маршрут			
А	Б	$M_{ПК}$	$M_{РКА}$	$M_{РКБ}$	$M_{НКО}$
1	1				
0	1		$ПШ_{РКА}$		$ПШ_{НКО}$
1	0			$ПШ_{РКБ}$	$ПШ_{НКО}$
0	0	$ПШ_{ПК}$	$ПШ_{РКА}$	$ПШ_{РКБ}$	$ПШ_{НКО}$

Таблица 3. **Определение конца рельсовой цепи, на который наложен поездной шунт (рельсовая цепь с тремя путевыми реле и неконтролируемым ответвлением)**

Состояние путевых реле			Реализованный маршрут				
А	Б	В	$M_{ПК}$	$M_{РКА}$	$M_{РКБ}$	$M_{РКВ}$	$M_{НКО}$
1	1	1					
1	1	0				$ПШ_{РКВ}$	$ПШ_{НКО}$
1	0	1			$ПШ_{РКБ}$		$ПШ_{НКО}$
1	0	0			$ПШ_{РКБ}$	$ПШ_{РКВ}$	$ПШ_{НКО}$
0	1	1		$ПШ_{РКА}$			$ПШ_{НКО}$
0	1	0		$ПШ_{РКА}$		$ПШ_{РКВ}$	$ПШ_{НКО}$
0	0	1		$ПШ_{РКА}$	$ПШ_{РКБ}$		$ПШ_{НКО}$
0	0	0	$ПШ_{ПК}$	$ПШ_{РКА}$	$ПШ_{РКБ}$	$ПШ_{РКВ}$	$ПШ_{НКО}$

маршрутом подвижная единица должна вступить на питающий (релейный) конец), ТО поездной шунт наложен на соответствующий конец.

ЕСЛИ (путевое реле в состоянии «выключено» И в соответствии с установленным маршрутом подвижная единица должна вступить на неконтролируемое ответвление), ТО

поездной шунт наложен на неконтролируемое ответвление.

(В случае использования в системе централизации рельсовых цепей без путевых реле вместо состояния путевых реле проверяется изменение (уменьшение до порогового уровня или ниже) уровня напряжения на входах приемников.)

Правила принятия решений для различных схем рельсовых цепей представлены в виде табл. 1–3, где использованы следующие обозначения: M_{XX} — в реализованном маршруте подвижная единица должна вступить на конец XX рельсовой цепи; $ПШ_{XX}$ — поездной шунт наложен на конец XX рельсовой цепи.

Таким образом, на основании непрерывного мониторинга реализованных маршрутов и значений диагностических параметров определяются рельсовые цепи, для которых проверку на шунтовую чувствительность можно считать выполненной в автоматическом режиме.

3. Алгоритм определения набора маршрутов, которые необходимо реализовать для выполнения в автоматическом режиме проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность

Обобщенный алгоритм формирования множества работ, которые необходимо выполнить, и множества действий, которые необходимо реализовать для принятия решения о выполнении работ в автоматическом режиме, показан на рис. 3, где использованы следующие обозначения:

- M — полное множество работ;
- E — полное множество событий;
- A — полное множество действий;
- E_f — множество состоявшихся событий, $E_f \subset E$;
- M_{nf} — множество невыполненных работ, $M_{nf} \subset M$;
- A_{mbf} — множество действий, которые должны быть выполнены для выполнения всех работ из M_{nf} , $A_{mbf} \subset A$;
- t_r — регламентированное время — время, не позднее которого работа должна быть выполнена (определяется на основании установленной в технической документации периодичности выполнения работы);

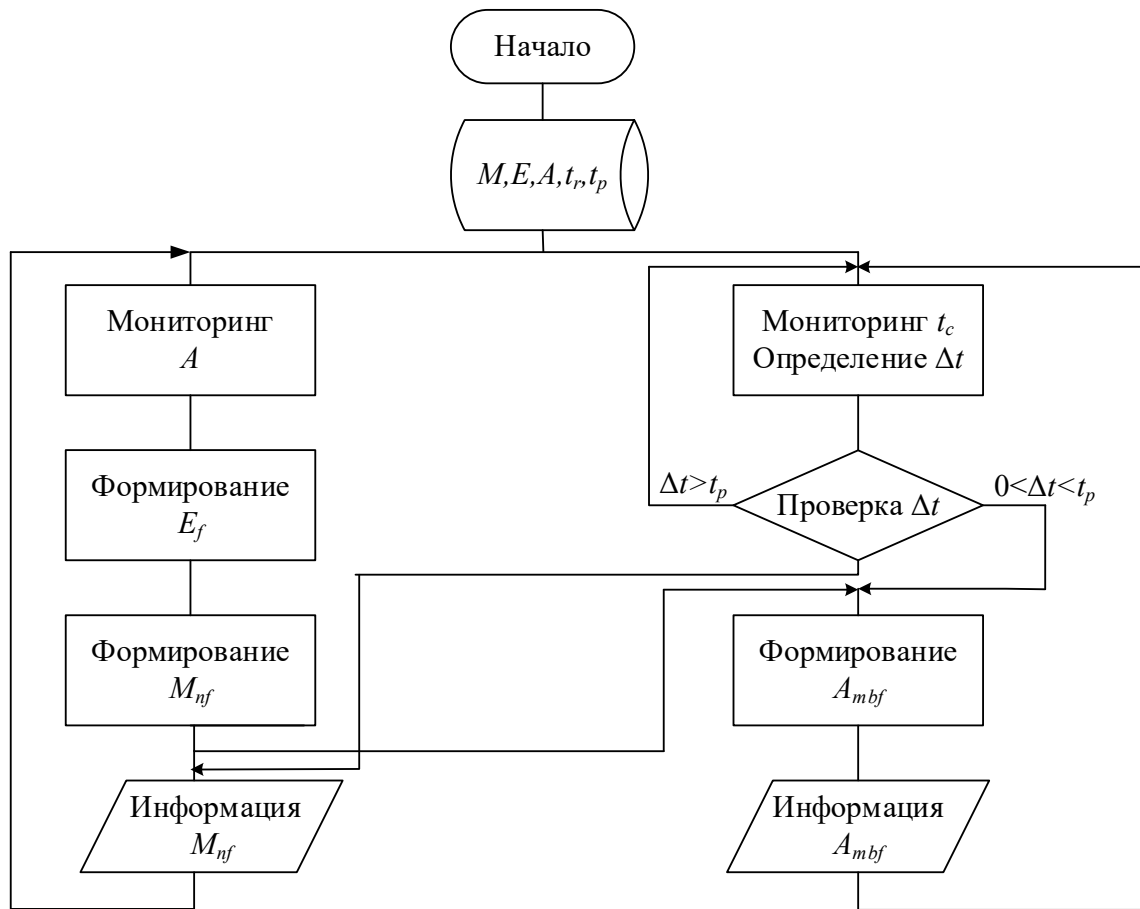


Рис. 3. Алгоритм формирования множества работ

t_p — превентивное время — время, предшествующее регламентированному времени с заданным запасом времени;

t_c — текущее время;

Δt — запас времени до момента t_r — разница между регламентированным и текущим временем.

Информация о множестве работ M_{nf} выдается эксплуатационному персоналу для оперативного планирования и непосредственного выполнения работ. Информация о множестве действий A_{mbf} выдается оперативному персоналу как рекомендация для организации движения поездов по станции. При этом должен быть определен минимальный набор действий $\min(A_{mbf})$, обеспечивающий выполнение всех работ из множества M_{nf}

В качестве примера рассмотрим алгоритм формирования набора $\min(A_{mbf})$ для фрагмента станции, показанного на рис. 1. На рис. 4 показан граф, вершины которого соответствуют событиям (крайние столбцы) и возможным действиям (средний столбец). Если в процессе

реализации действия a происходит событие e , то соответствующие вершины связаны между собой. Как видно, для рассматриваемого множества возможных действий не все события могут произойти, следовательно, не все работы из заданного множества могут быть выполнены.

Пусть в течение периода наблюдения были реализованы действия МППЧ, МП7АЧ, МО4ЧД, МОПЧД (здесь использованы следующие обозначения: МП — маршрут приема; МО — маршрут отправления; П, 7А, 4, ПП — номера путей; Ч и ЧД — соответственно секции ЧП и ЧДП, через которые проходит маршрут). Исходный граф для определения набора $\min(A_{mbf})$ показан на рис. 5 и получен путем удаления из полного графа (рис. 4) вершин, соответствующих событиям, которые считаются произошедшими при реализации четырех рассмотренных действий, а также вершин, соответствующих невыполнимым событиям. Вершины этого графа, расположенные в крайних столбцах, составляют множество невыполненных работ M_{nf}

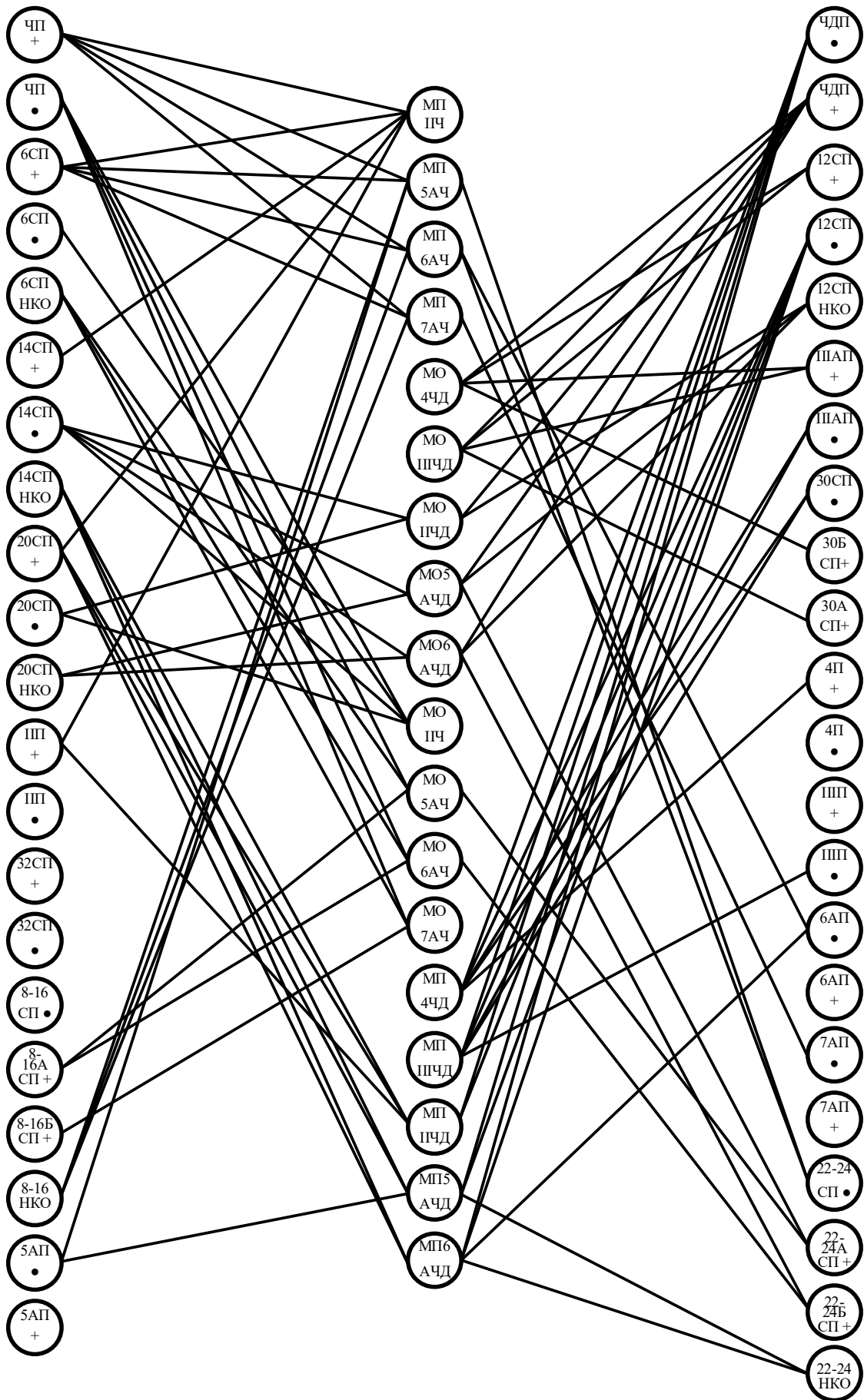


Рис. 4. Граф событий и действий (полный)

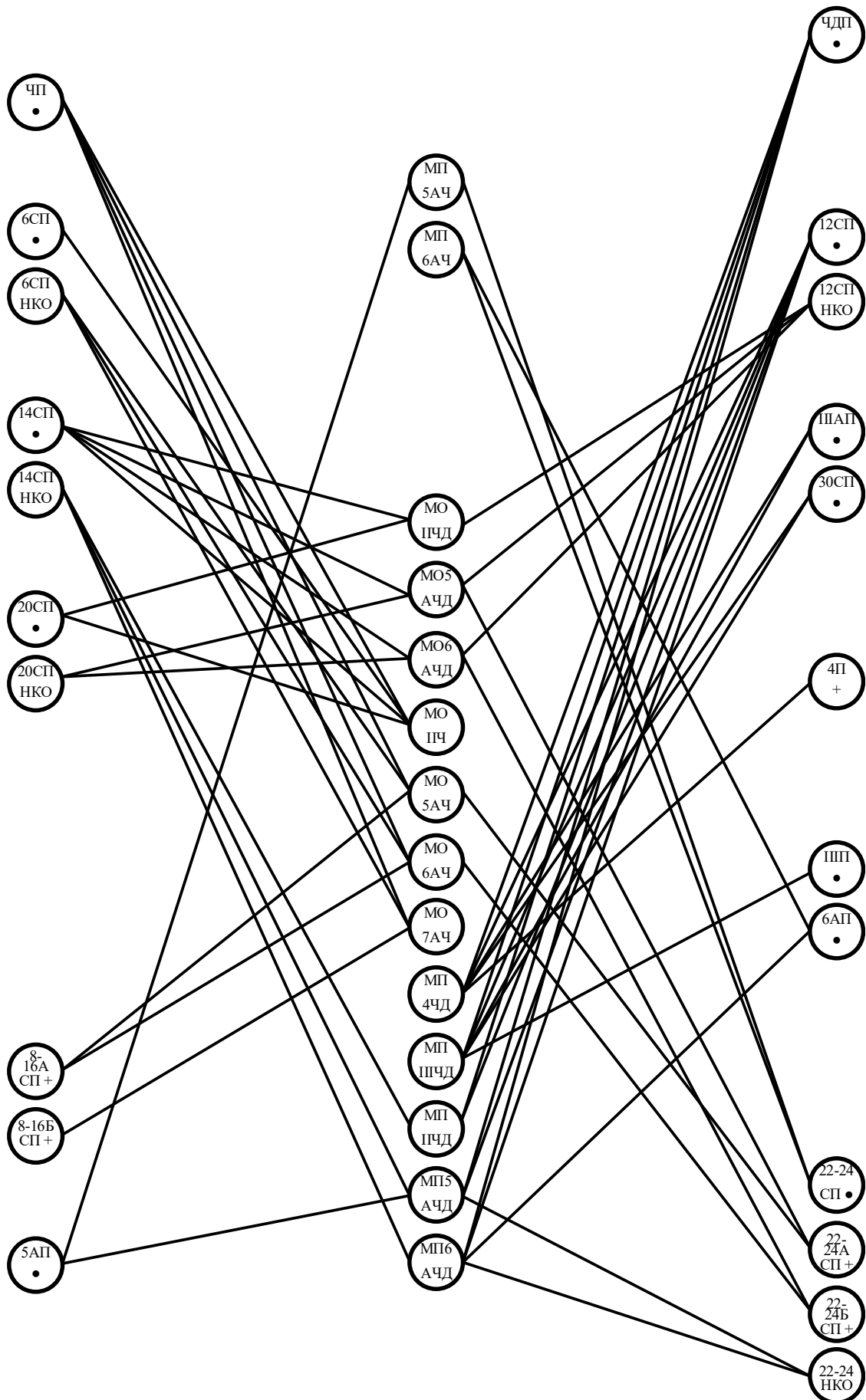


Рис. 5. Исходный граф для выбора минимального набора действий $\min(A_{mbp})$

Применяя описанный в [6] алгоритм определения минимального набора действий, обеспечивающего выполнение всех работ из множества M_{nf} на первом шаге выбираем события, каждое из которых связано только с одним действием, — 4П+, 3П, 6СП. На втором шаге выбираем действия, реализация которых необходима для выполнения этих событий, — МП4ЧД, МППЧД, МОПЧ. На третьем шаге выбираем события, связанные с этими действиями и не выбранные на шаге 1, — ЧП, 14СП, 20СП, ЧДП, 12СП, ШАП, 30СП. Исключая из графа вершины, выбранные на шагах 1 и 3, повторяем шаги 1–3 до тех пор, пока в графе не останется вершин, соответствующих событиям. В итоге получим $\min(A_{mbf}) = \{\text{МП4ЧД, МППЧД, МОПЧ, МО7АЧ, МО5АЧД, МО6АЧД, МП5АЧД, МП6АЧД, МП6АЧ, МО6АЧ}\}$.

Таким образом, на основании непрерывного мониторинга реализованных маршрутов определяется набор маршрутов, которые необходимо реализовать дополнительно для выполнения в автоматическом режиме проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. С целью сокращения трудозатрат на выполнение работ по проверке станционных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность предложено автоматизировать процесс на основе результатов логического контроля занятия рельсовых цепей подвижными единицами в ходе реализации маршрутов, установленных в системе централизации стрелок и светофоров, и результатов измерения значенных параметров рельсовых цепей при переходе из нормального режима в шунтовой и обратно. При этом проверка на шунтовую чувствительность будет считаться выполненной, а рельсовая цепь будет считаться исправной, если процесс реализован логически правильно и значения всех диагностических параметров находятся в пределах, установленных технической документацией.

2. Разработан алгоритм принятия решения о выполнении в автоматическом режиме

проверки рельсовой цепи на шунтовую чувствительность на основании непрерывного мониторинга реализованных маршрутов и смены состояний рельсовых цепей.

3. Разработан алгоритм определения набора маршрутов, которые необходимо реализовать для выполнения в автоматическом режиме заданного множества проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность.

4. Интеграция разработанных алгоритмов принятия с известными алгоритмами логического контроля функционирования (контроль последовательного занятия и освобождения рельсовых цепей) и технического состояния (измерение остаточного напряжения при шунтовом режиме рельсовой цепи) позволит расширить набор задач, решаемых в процессе автоматизации технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. ▲

Библиографический список

1. Брылеев А. М. Рельсовые цепи / А. М. Брылеев. — М.: Трансжелдориздат, 1939. — 312 с.
2. Якушев А. В. Изменение величины электрического сопротивления колесных пар вагонов метро с увеличением срока эксплуатации / А. В. Якушев, С. А. Фомин, Ю. В. Гомонец // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 100–107.
3. Кравцов Ю. А. Вероятностная модель поездного шунта для легких подвижных единиц и отцепов / Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский, В. М. Баранников // Совершенствование и повышение надежности железнодорожных систем автоматики, телемеханики и связи: сборник научных трудов (Труды ДИИТ). — Днепропетровск: Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1990. — С. 24–29.
4. Кравцов Ю. А. Исследование сопротивления шунта для линии скоростного трамвая / Ю. А. Кравцов // Вопросы повышения надежности и эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики: Труды УЭМИИТ. Вып. 75. — Свердловск: Урал. электромеханический ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1985. — С. 11–17.
5. Sun Sh. Research on Method for Calculation of Shunt Resistances of Track Circuits Using Electrical Contact Theory / Sh. Sun, H.-B. Zhao, D.-W. Chen et al. // Journal of the China Railway Society. — March 2014. — Vol. 36. — Iss. 3. — Pp. 31–36. — DOI: 10.3969/j.issn.1001-8361.2014.03.006.
6. Швалов Д. В. Сокращение ресурсозатрат при реализации планово-предупредительного технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики на основе цифровых моделей / Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 178–187. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-02-178-187.
7. Бушуев С. В. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути / С. В. Бушуев,

- А. Н. Попов, М. Л. Попова // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 2. — С. 202–220. — DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-202-220.
8. Сперанский Д. В. Задачи оптимизации ресурсов в области технической эксплуатации систем автоматики и телемеханики / Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, А. В. Орлов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 184–203. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203.
 9. Dao C. Maintenance scheduling for railway tracks under limited possession time / C. Dao, R. Basten, A. Hartmann // Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. — 2018. — Iss. 144(8). — DOI: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000163>.
 10. Патент № 2628619 С1 Российская Федерация, МПК В61L 25/00. Рельсовая цепь: № 2016119646: заявл. 20.05.2016; опубл. 21.08.2017 / В. Б. Жуматанова, Н. Н. Севостьянов, М. М. Соколов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».
 11. Патент № 184692 U1 Российская Федерация, МПК В61L 23/16, В61L 1/18. Рельсовая цепь: № 2018121913: заявл. 13.06.2018; опубл. 06.11.2018 / С. А. Лунев, М. М. Соколов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения».
 12. Соколов М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей / М. М. Соколов // Известия Трансссиба. — 2016. — № 3(27). — С. 124–131.
 13. А. с. 356185, МПК В61L 3/12. Устройство локомотивной сигнализации / В. Г. Дудин. № 1408291/18-24; приоритет изобретения 25.11.1970; опубл. 23.10.1972, Бюл. № 32.
 14. А. с. 564203, МПК В61L 25/06. Устройство для обнаружения потери шунтового эффекта на рельсовом транспортном средстве / А. И. Корабельщиков, Е. В. Орешкин, М. А. Певанер и др.; патентообладатель Проектно-конструкторское бюро Главного управления локомотивного хозяйства; приоритет изобретения 24.10.1975; опубл. 05.07.1977, Бюл. № 25.
 15. А. с. 852693, МПК В61L 25/06. Устройство контроля потери шунта на рельсовом транспортном средстве / С. Н. Белецкий, В. В. Петченко, Л. Н. Завгородний и др.; патентообладатели С. Н. Белецкий, В. В. Петченко, Л. Н. Завгородний, А. И. Абражаев; приоритет изобретения 22.01.1980; опубл. 07.08.1981, Бюл. № 29.
 16. Патент № SU 1025562 А Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Устройство для обнаружения потери шунтового эффекта в рельсовой цепи / А. В. Лыков, В. Б. Гуменников, А. М. Вербовик; патентообладатели Куйбышевский институт инженеров железнодорожного транспорта и Куйбышевская орден Ленина железная дорога; приоритет изобретения 24.02.1982; опубл. 30.06.1983, Бюл. № 24.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 19–32
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32

Decision-Making Algorithms for Automated Performance and Scheduling of Shunt Sensitivity Testing of Rail Circuits

Information about author

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

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

Abstract: The article considers the issues of practical application of the approach on performance automation and scheduling of works on the maintenance of railway automatics and remote controlling devices in the process of planned preventive maintenance realization which includes the analysis of known ways to automate railway circuit inspections on shunt sensitivity and shunt effect performance control in the process of finding a moving unit on a rail circuit. At present, topical problem is the reduction of labor costs on the maintenance of dispersed objects of automatics and remote control which to solve for, we propose to use algorithms providing for technological situation identification and determination of the many of works which will be considered automatically as accomplished as well as the many of ones which will be needed to be accomplished in due time. The essence of the proposed approach to automation of being considered processes is in the following: if in the process of rail circuit functioning in regular mode, the situation, that's analogous to the performance of work on shunt sensitivity testing (that's stipulated by work operation technology), is realized, then work is considered to be accomplished at the presence of means of reliable control for the values of rail circuit parameters.

Keywords: rail circuits; maintenance; maintenance planning; automated maintenance; shunting sensitivity of rail circuit; technical diagnostics and monitoring.

References

1. Bryleev A. M. *Relsovyje tsepi* [Track circuits]. M.: Transzheldorizdat Publ., 1939, 312 pp. (In Russian)
2. Yakushev A. V., Fomin S. A., Gomonets Yu. V. *Izmenenie velichiny elektricheskogo soprotivleniya kolesnykh par vagonov metro s uvelicheniem sroka eksploatatsii* [Changing electrical resistance value of subway car wheelsets with increasing operation period]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 100–107. (In Russian)
3. Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M., Barannikov V. M. *Veroyatnostnaya model' poezdnoy shunta dlya legkikh podvizhnykh edinits i ottsefov. Sovershenstvovanie i povyshenie nadezhnosti zheleznodorozhnykh sistem avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: sbornik nauchnykh trudov (Trudy DIIT)* [Probabilistic model of a train shunt for light moving units and cuts. Improvement and reliability of railway systems of automation, telemechanics and communication: collection of scientific papers (Proceedings of DIIT)]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskii in-t inzhenerov zh.-d. transp. Publ., 1990, pp. 24–29. (In Russian)
4. Kravtsov Yu. A. *Issledovanie soprotivleniya shunta dlya linii skorostnogo tramvaya [Shunt resistance study for a high-speed tram line. Voprosy povysheniya nadezhnosti i effektivnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: Trudy UEMIIIT* [Investigation of shunt resistance for a high-speed tram line. Issues of improving the reliability and efficiency of railway automation and telemechanics systems: Proceedings of UEMIIIT]. Sverdlovsk: Ural. elektromekhanicheskii in-t inzhenerov zh.-d. transp. Publ., 1985, Iss. 75, pp. 11–17. (In Russian)
5. Sun Sh., Zhao H.-B., Chen D.-W. et al. Research on Method for Calculation of Shunt Resistances of Track Circuits Using Electrical Contact Theory. *Journal of the China Railway Society*. March 2014, vol. 36, Iss. 3, pp. 31–36. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8361.2014.03.006.
6. Shvalov D. V. *Sokraschenie resursozatrata pri realizatsii planovogo-predupreditel'nogo tahnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki na osnove tsifrovoyh modelei* [Reduction of resource costs when implementing preventive maintenance of

- railway automation devices based on digital models]. *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research]. 2022, vol. 8, Iss. 2, pp. 178–187. (In Russian)
7. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti sredstv kontrolya svobodnosti uchastkov puti [Evaluation of the economic efficiency of track occupation monitoring means]. *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research]. 2019, vol. 5, Iss. 2, pp. 202–220. (In Russian)
 8. Speranskii D. V., Gorelik A. V., Orlov A. V. Zadachi optimizatsyi resursov v oblasti tekhnicheskoi ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Tasks of resource optimization in the field of technical operation of automation and telemechanics systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 184–203. (In Russian)
 9. Dao C., Basten R., Hartmann A. Maintenance scheduling for railway tracks under limited possession time. *Journal of Transportation Engineering. Part A: Systems*. 2018, Iss. 144(8). DOI: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000163>.
 10. Zhumatanova V. B., Sevostianov N. N., Sokolov M. M., *Relsovaya tsep* [Track Circuit]. Patent RF, no. 2628619 C1, 2017. (In Russian)
 11. Lunev S. A., Sokolov M. M., *Relsovaya tsep* [Track Circuit]. Patent RF, no. 184692 U1, 2018. (In Russian)
 12. Sokolov M. M. Sovershenstvovanie tekhnologii obsluzhivaniya stantsionnykh relsovykh tsepей [Improving maintenance technology for station track circuits]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2016, Iss. 3 (27), pp. 124–131. (In Russian)
 13. Inventor's certificate of competence № 356185. B61L 3/12. Ustroistvo lokomotivnoi signalizatsii [Locomotive signalling device]. Author: Dudin V.G. Application № 1408291/18-24 (priority 25.11.1970); published on 23.10.1972, Bul. № 32. (In Russian)
 14. Korabelshchikov A. I., Oreshkin E. V., Pevaner M. A. et al. Inventor's certificate of competence № 564203. B61L 25/06. Ustroistvo dlya obnaruzhenia poteri shuntovogo effekta na relsovom transportnom sredstve [Device for detecting shunt loss on a rail vehicle]. Patent holder Design and Development Bureau of the Main Locomotive Department; patent priority 24.10.1975; published on 05.07.1977, Bul. № 25. (In Russian)
 15. Beletskii S. N., Petchenko V. V., Zavgorodnii L. N. et al. Inventor's certificate of competence № 852693. B61L 25/06. Ustroistvo kontrolya poteri shunta na relsovom transportnom sredstve [Shunt loss monitoring device for rail vehicles]. Patent holders S. N. Beletskii, V. V. Petchenko, L. N. Zavgorodnii et al.; patent priority 22.01.1980; published on 07.08.1981, Bul. № 29. (In Russian)
 16. Lykov A. V., Gumennikov V. B., Verbovik A. M., Ustroistvo dlya obnaruzhenia poteri shuntovogo effekta v relsovoi tsepi [A device for detecting the loss of the shunt effect in a rail circuit]. Patent RF, no.1025562 A, 1983. (In Russian)

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ СКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры¹;
e-mail: valenfalk@mail.ru

КОПЫЛОВА Екатерина Витальевна, д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры²;
e-mail: miit.kopylova@yandex.ru

САФРОНОВ Антон Игоревич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹; e-mail: safronov-ai@mail.ru
ТУМАНОВ Михаил Андреевич, ст. преподаватель²; e-mail: miit.tumanov@yandex.ru

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва
² Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», Москва

В статье проанализирован технологический процесс организации перевозочного процесса и управления им в различных системах скоростного транспорта городских агломераций. Представлено обобщение технологических схем организации перевозочного процесса при составлении нормативных документов-графиков: движения поездов, оборота подвижного состава, работы локомотивных бригад. Выявлены общие черты, позволяющие переносить положительный опыт автоматизации и цифровизации из одних транспортных систем в другие. В качестве типового примера для скоростного транспорта городских агломераций рассмотрена работа Московского центрального кольца в нотации диаграмм потоков данных. Показано, что условия планирования движения на Московском центральном кольце аналогичны действующим для кольцевых линий метрополитена. В качестве обобщающих понятий выступают: смешанность, непараллельность, зональность, неавтономность. Приведены соответствующие иллюстративные примеры. Накопленный опыт в области автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций рассмотрен на примерах железнодорожного участка Нижний Новгород — Урень, а также Калужско-Рижской линии Московского метрополитена (электродепо «Калужское» и «Свиблово»). В статье описано множество исходных данных для построения графика движения поездов, сформулирована цель его построения, выявлены ограничения, отражающие связи между объектами, внутри множества выделенных ресурсов и ограничения, определяемые правилами обслуживания пассажиров. Проведенный в статье анализ показал перспективные направления развития автоматизированных транспортных систем на основе накопленных баз знаний. В результате применения комплексного подхода к решению задач автоматизированного управления при использовании технологий искусственного интеллекта и больших данных планируется повышение эффективности использования множества выделенных ресурсов, процента выполнения графика движения поездов и др.; сокращение количества ошибок передачи информации, а также возникающих в результате влияния негативного человеческого фактора и др.

Ключевые слова: скоростной транспорт; городская агломерация; график движения поездов; график оборота; график работы локомотивных бригад; оперативное управление; обучение персонала; тренажер; база данных; база знаний.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48

▼ Введение

Современный скоростной транспорт городских агломераций представляет собой комбинацию участков пригородного железнодорожного транспорта, линий метрополитена и скоростного трамвая, каждый из которых в определенной мере автономен, отличается инфраструктурой, подвижным составом, динамикой пассажиропотока и интервалов движения транспортных средств, но все они находятся в тесной связи

между собой. Поддержание высокой интенсивности движения, обеспечение безопасности движения транспортных средств рассматриваемых систем, соблюдение правил комфортного обслуживания пассажиров и эффективное использование производственных ресурсов базируются на комплексном подходе к решению задач планирования и управления перевозочным процессом, которое невозможно и неэффективно без применения интеллектуальных

информационных технологий [1]. Решение задач автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций уже показало свою важность при рационализации использования имеющихся, часто ограниченных, производственных ресурсов и реализации концепции бережливого производства, что дает прекрасные перспективы для дальнейшего развития этих технологий.

Примером скоростного транспорта городских агломераций может служить транспортный комплекс Москвы, который включает в себя пригородный железнодорожный транспорт в черте города и его ближайших «спутников» (Московские центральные диаметры (МЦД) и Московское центральное кольцо (МЦК)) [1], Московскую монорельсовую транспортную систему [2], метрополитен [1] и скоростной трамвай [3].

Целью статьи является определение перспективных направлений автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций на базе анализа накопленного опыта, выявления общих и отличительных черт каждой из транспортных систем из рассматриваемого множества и определения прототипов существующего программного обеспечения, обладающих наибольшим потенциалом для расширения функционала и области применения.

В ходе исследований, проведенных авторами статьи, построена диаграмма потоков данных, привязанная к организационной структуре системы управления перевозочным процессом на МЦК, которая выступает как типовой пример скоростного транспорта городских агломераций (рис. 1). Перевозочный процесс при поддержке всех дирекций ОАО «РЖД» реализуют региональные подразделения Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД» (ЦД) и Дирекции скоростного сообщения — филиала ОАО «РЖД» (ДОСС), функционирующие в рамках Московской железной дороги (МЖД), Московская дирекция управления движением (МДУД) и Московская дирекция скоростного сообщения (МДОСС). Задание на перевозочный процесс формирует Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города (Департамент транспорта города)

Москвы. Ремонт и обслуживание подвижного состава осуществляет аутсорсинговая компания ОАО «ВСМ-Сервис». Компания специализируется на регулярном обслуживании высокоскоростных поездов «Сапсан» и региональных электропоездов «Ласточка» (технические осмотры производятся в моторвагонном депо «Подмосковное»).

Перевозочный процесс осуществляется согласно нормативным документам: графику движения поездов (ГДП), графику оборота электроподвижного состава (ГО) и графику работы локомотивных бригад (ГР ЛБ). Результаты фактического исполнения движения посредством телеметрии передаются в автоматизированные системы управления (АСУ), предназначенные, в частности, для построения графика исполненного движения (ГИД). Вместе с тем данные, полученные АСУ, проходят интеллектуальный анализ в системах поддержки принятия решений (СППР). На основе результатов интеллектуального анализа вырабатываются управленческие решения по оперативному управлению перевозочным процессом, а также для внесения корректировок во множество исходных данных, необходимых для построения ГДП, собственно ГДП, ГО и ГР ЛБ.

1. Формирование исходных данных для построения графика движения поездов

Исходными данными для построения ГДП, обеспечивающих пассажирские перевозки, являются как технико-эксплуатационные параметры и условия работы транспорта, так и существующие и прогнозируемые пассажиропотоки [4] на рассматриваемых участках. На основе этих данных определяются размеры движения, которые необходимо реализовать на ГДП. Методологическая основа для определения размеров движения пригородных пассажирских поездов создана профессором Ю. О. Пазойским [5–7], а для метрополитенов — профессором В. Г. Сидоренко [1, 8, 9].

В современных научных исследованиях при определении размеров движения рекомендуется использовать предварительно организованный пассажиропоток. Проблема организации пригородного пассажиропотока, то есть сознательного преобразования стихийного

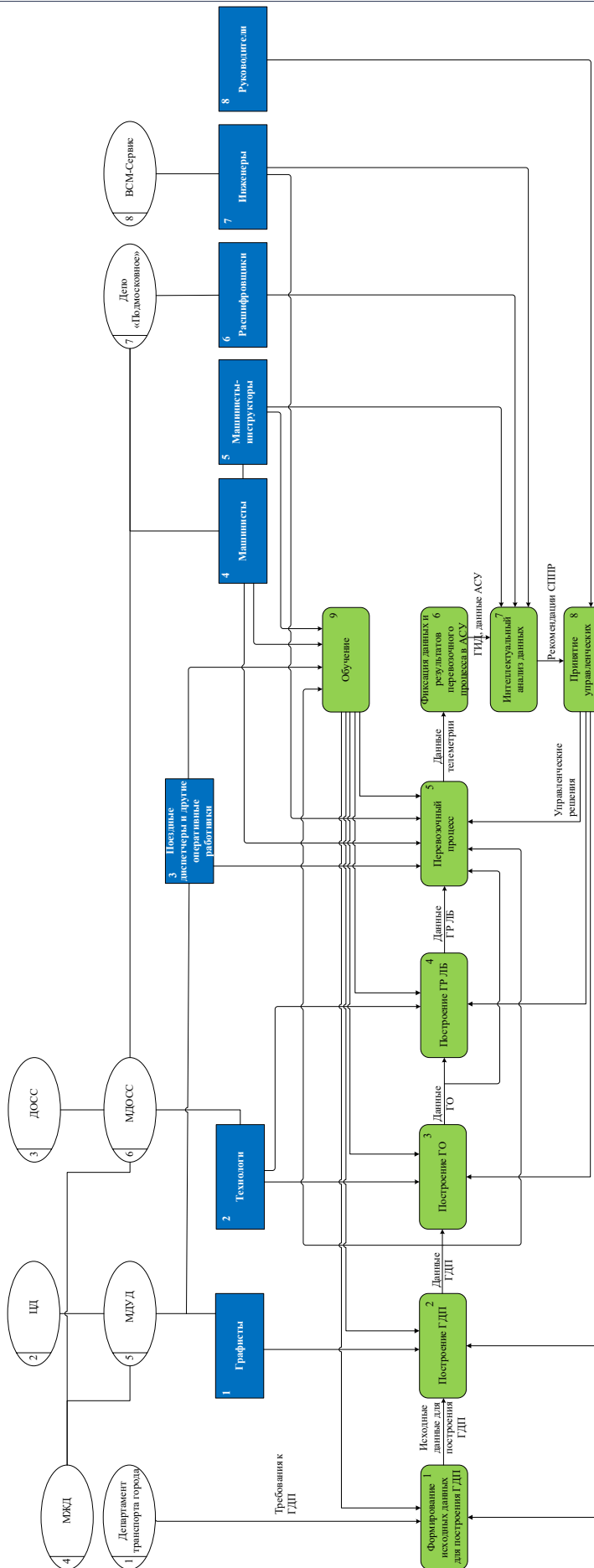


Рис. 1. Диаграмма потоков данных системы управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций

пассажиропотока в зависимости от различных параметров, освещена в работе [10]. Организация пассажиропотока позволяет найти разумный компромисс между возможностями транспорта и требованиями пассажира к поездке.

Пассажиропоток, а значит, и размеры движения зависят от времени суток и дня недели, а также могут определяться особенностями конкретной даты, связанными с проведением тех или иных массовых мероприятий [8, 11].

Существенной особенностью организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте, а в последнее время и на метрополитене, является необходимость предоставления «окон» [12] для выполнения ремонтных работ на объектах инфраструктуры. В наибольшей степени это затрагивает пригородное и пригородно-городское сообщение. Для обеспечения перевозочного процесса и необходимого качества пассажирских перевозок в эти периоды разрабатываются варианты ГДП. При этом необходимо решать оптимизационные задачи, направленные на повышение эффективности использования подвижного состава и соблюдение требований пассажиров, предъявляемых к комфорту поездки [13–15]. Сказанное выше определяет такую особенность задач построения ГДП, как неавтономность.

Цель построения ГДП для скоростного транспорта городских агломераций — организовать движение подвижного состава в соответствии с заданными размерами движения в заданный временной промежуток внутри суток с учетом особенностей организации движения в начале и конце интервала работы транспортной системы внутри суток и других особенностей.

Задание на ГДП кроме цели включает в себя еще ограничения, отражающие связи между объектами, внутри множества выделенных ресурсов и ограничения, определяемые правилами обслуживания пассажиров:

- частота ввода/снятия подвижного состава на промежуточных остановочных пунктах;
- ограничение на максимальный интервал по отправлению транспортных средств;
- и др.

Множество выделенных ресурсов включает в себя ресурсы рассматриваемой системы скоростного транспорта. Как правило, инфраструктура такой системы представляет собой

граф, вершинами которого являются остановочные пункты, места изменения направления движения, отстоя (расстановки), обслуживания подвижного состава и др.; ребрами — участки путей, соединяющие эти объекты, в частности перегоны или участки станционных путей. Однотипные объекты объединяются во множества и описываются идентичными для объектов одного и того же класса кортежами, которые включают в себя информацию об уникальном ключе объекта в базе данных, наименовании, местоположении, особенностях (например, конечные и промежуточные остановочные пункты/станции), режиме работы (например, для пунктов обслуживания подвижного состава или возможные времена хода для перегонов), связях с другими объектами (например, составы какого депо обслуживаются в каких пунктах обслуживания, какие типы обслуживания могут выполняться в каком пункте обслуживания).

Весь подвижной состав приписан к депо, и это определяет особенности его обслуживания и местоположения вне движения.

Связи между объектами внутри множества выделенных ресурсов являются ограничениями, учитываемыми при синтезе ГДП и ГО. В случае появления новых ограничений они могут быть учтены путем ввода новых компонентов в последовательности, описывающие выделенные ресурсы линии.

Результатами планирования перевозочного процесса на основе собранных данных для каждого набора данных является совокупность трех графиков: ГДП, ГО, ГР ЛБ.

Соответствующие процессы и вопросы их автоматизации рассмотрены в следующих трех разделах.

2. Построение графика движения поездов

ГДП является основой планирования функционирования соответствующей транспортной системы. Отличительной чертой железнодорожного скоростного транспорта по сравнению с метрополитеном является наличие смешанного движения, при котором существует сильная непараллельность и зональность ГДП. Смешанное движение — движение, при котором по одним и тем же путям могут двигаться поезда со значительно различающимися множествами

плановых времен хода и остановочных пунктов, что характерно, например, для МЦД. На участках железных дорог, относящихся к МЦД, осуществляют движение пригородные поезда МЦД с различной длиной маршрутов [16], пригородные поезда, пассажирские поезда дальнего сообщения и грузовые составы.

Наличие этих особенностей движения (смешанность, непараллельность, зональность, неавтономность) делает процесс автоматизации построения ГДП достаточно сложной математической задачей, над решением которой работают отечественные и зарубежные ученые [6, 7, 17, 18].

С точки зрения условий планирования движения МЦК близко к кольцевым линиям метрополитена, так как на МЦК отсутствуют смешанность, зональность и непараллельность движения.

В настоящее время на сети ОАО «РЖД» функционируют средства автоматизации создания графического образа ГДП, практически никак не автоматизирующие интеллектуальную деятельность технологов по составлению ГДП.

Применительно к метрополитенам задача автоматизации построения ГДП во многом решена, накоплен опыт преодоления особенностей ГДП, связанных с непараллельностью, зональностью и неавтономностью:

- разработана онтологическая математическая модель [19] линии метрополитена [1], доказавшая свою применимость как для решения задач автоматизированного планирования, так и управления движением;
- синтезированы модели процессов построения ГДП разных типов: традиционного [20–23], кольцевого, зонного и вилочного [9, 24];
- создан инструментарий для решения задач оптимизации ГДП как с использованием графовых моделей, так и генетического алгоритма [1, 25];
- сформулированы принципы и политики реализации вычислительных процессов построения ГДП [1, 26];
- формализованы алгоритмы поддержания равномерности движения в условиях неавтономности [22];
- разработаны алгоритмы энергооптимального планирования движения [27–30], в том числе и непараллельного [31];

- построена модель пользовательского интерфейса автоматизированных систем построения ГДП, включающая в себя различные способы визуализации исходных данных и результатов построения, средства проверки полученных результатов на соответствие предъявляемым требованиям и оценки их качества по различным критериям, а также интеграции с другими информационными системами [1, 9].

Полученные авторами результаты показали применимость к реальным условиям, адаптируемость к их изменению и эффективность при реализации в разработанной на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) и эксплуатируемой на Московском метрополитене с 2003 г. «АРМ Графиста» [1]. Этапы развития теоретической базы построения ГДП применительно к метрополитенам, системы «АРМ Графиста» и входящих в ее состав подсистем изложены в [9]. На рис. 2 представлен фрагмент ГДП МЦК, построенный в «АРМ Графиста», что подтверждает возможность ее использования не только для метрополитена.

Принципы открытости, модульности, масштабируемости и использования MVC¹ модели построения программного обеспечения, заложенные в основу «АРМ Графиста», делают эту систему перспективной для наращивания функциональных возможностей, связанных как с расширением базы данных скоростного транспорта, для которого строится ГДП, так и базы знаний автоматизируемых операций, действий, функций, процедур и процессов.

В условиях ярко выраженного сращивания разрозненных ранее транспортных систем [32] создание единого инструментария автоматизации технологических и бизнес-процессов является важным фактором повышения уровня интеграции скоростного транспорта городских агломераций.

3. Построение графика оборота электроподвижного состава

Подходы к планированию проведения профилактических и ремонтных мероприятий,

¹ *Model-View-Controller* — схема обособления управляющей логики от данных приложения, повышающая удобство коллективной (командной) разработки программного обеспечения.

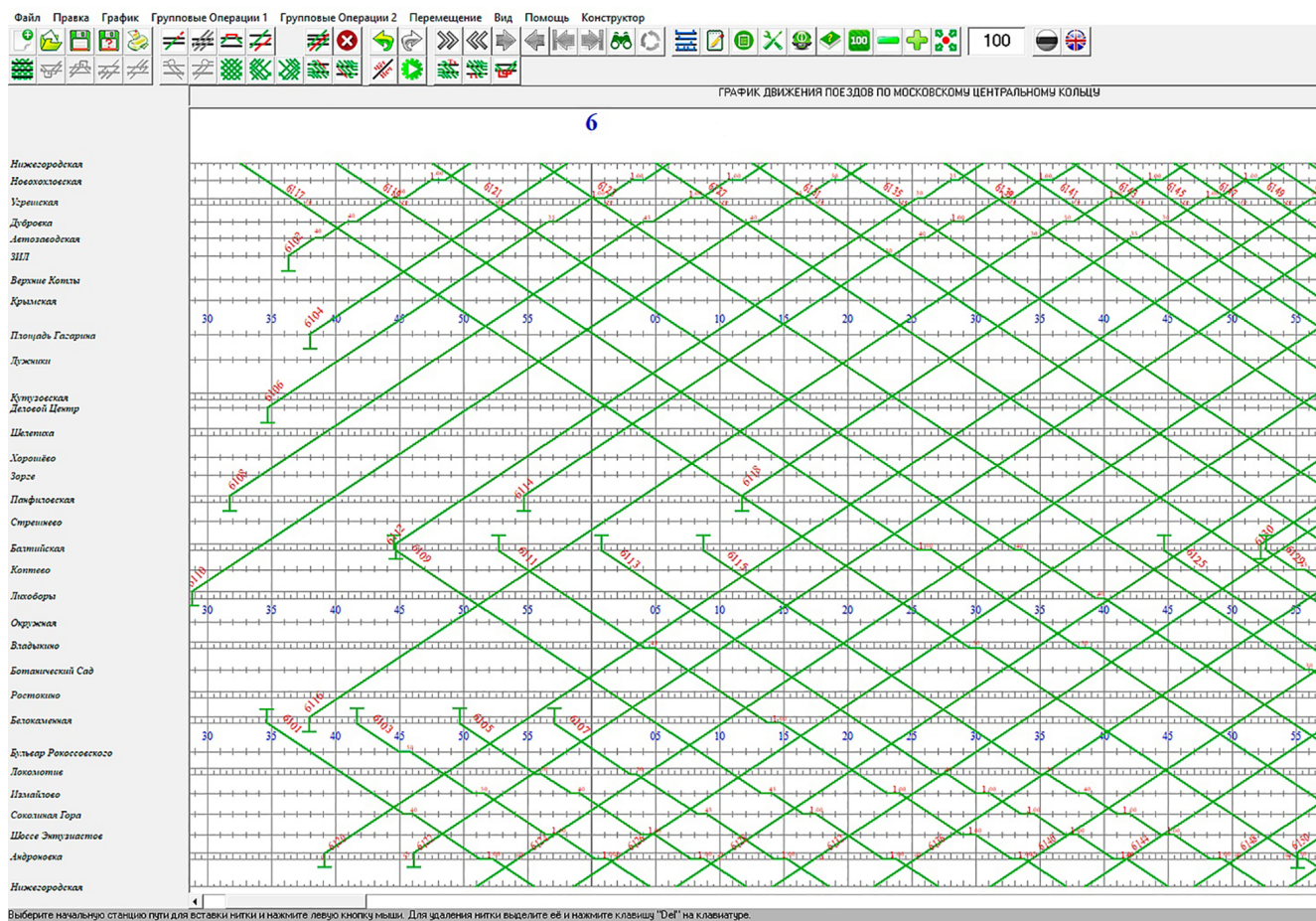


Рис. 2. Фрагмент ГДП МЦК, построенный в «АРМ Графиста»

закладываемых в ГО моторвагонного подвижного состава, на железнодорожном транспорте и на метрополитене различаются.

На железнодорожном транспорте эти задачи решаются разными специалистами, относящимися к разным дирекциям, и влияние ГО на ГДП (обратная связь) практически отсутствует, то есть система разомкнута. Это показано на рис. 1. На этапе составления ГДП отсутствует привязка подвижного состава к конкретным элементам ГДП, она осуществляется именно на этапе составления ГО. В настоящее время на железной дороге составление ГО производится вручную путем заполнения электронных таблиц. Высокая мощность множеств элементов графика, на которых могут использоваться элементы множества подвижного состава, высокая мощность множества единиц подвижного состава, а также отсутствие строгой математической формализации многих требований делает эту задачу перспективной для более глубокой проработки [33, 34].

Задачу построения ГО пригородных поездов чаще всего решали эвристически. Профессор Ю. О. Пазойский [5, 6] предложил модель строгой оптимизации. Однако эта модель статическая. Наиболее перспективным является новый метод расчета оборота составов электропоездов с помощью оптимизационной модели, основанной на динамической транспортной задаче. Метод позволяет не только найти оптимальный вариант оборота составов, но и предоставляет материалы для его критической оценки. В работах [35, 36] рассмотрено три варианта использования метода оптимизации обеспечения составами «ниток» графика движения пригородных поездов:

- при заданном числе составов и разрешении на сдвиг «ниток» графика;
- при заданном числе составов и запрете сдвига «ниток» графика;
- при свободном привлечении составов из заданного резерва и различных стоимостных параметрах, влияющих на задержки потоковых точек и ожидание составов.

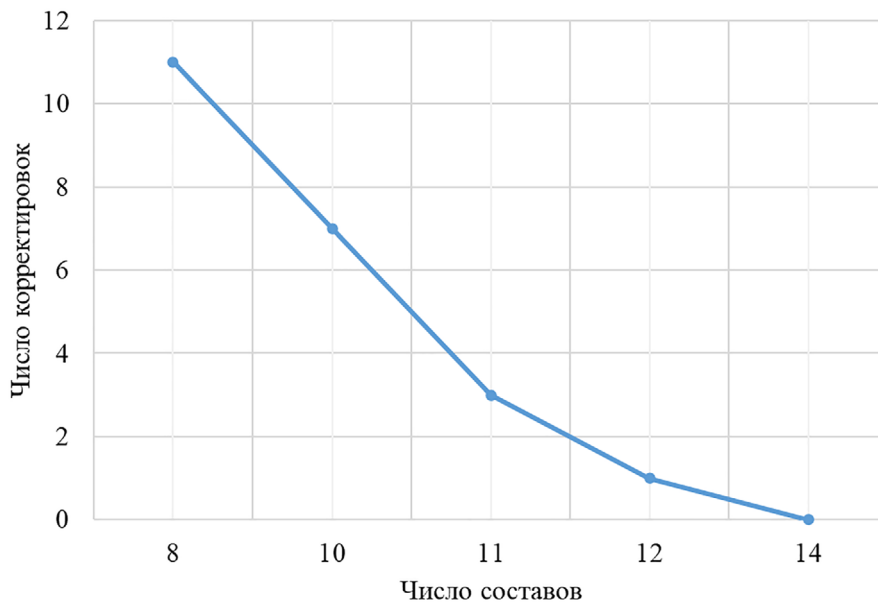


Рис. 3. Зависимость числа корректировок «ниток» ГДП от числа составов

Апробация метода произведена на примере пригородных железнодорожных перевозок в Нижегородской агломерации.

Модель полностью отображает процесс оборота составов и обслуживание ими «ниток» графика и рассчитывает оборот составов, оптимальный по минимуму затрат. Начальное размещение может указываться, но используемая методика позволяет получить рекомендуемое моделью число составов на начальный момент на станциях из числа разрешенных. В результате расчетов формируется рекомендуемый ГДП с корректировкой «ниток» графика, если она потребовалось. Корректировка может быть только вынужденной, если задано недостаточное число составов в обороте. На примере участка Нижний Новгород — Урень были проведены эксперименты по постепенному увеличению числа используемых составов (рис. 3).

На графике (рис. 3) видно, что 8 составов недостаточно для выполнения заданного ГДП — приходится сдвигать 11 «ниток» графика. Для обеспечения всех «ниток» без корректировки требуется 14 составов, но при 12 составах корректируется всего одна «нитка». Если сдвиг небольшой, то, может, целесообразнее сократить два состава при небольшом сдвиге всего одной «нитки». То есть модель позволяет проводить совместную оптимизацию — одновременно ГО и ГДП. Этот подход не может быть реализован в статических моделях.

Используемый программный аппарат позволяет просматривать ГДП и ГО составов в целом по участку или ГО каждого отдельного состава. Для оценки полученного варианта можно также использовать выдаваемые моделью производительность составов в километрах и занятость составов по часам суток. Меняя весовые коэффициенты перед переменными, описывающими использование составов и сдвиг «ниток» графика, можно находить разные компромиссные оптимумы, которые на практике позволят получить существенную экономию ресурсов железнодорожного транспорта.

На метрополитене налажено тесное взаимодействие сотрудников Службы движения и электродепо при составлении ГО. Сформулированные сотрудниками электродепо требования к периодичности проведения технического обслуживания учитываются на этапе составления ГДП. Маршруты (составы с присвоенными им на сутки номером) назначаются на «нитки» ГДП, которые описывают движение маршрута от момента выхода на главный путь до момента ухода с него с указанием маневровых передвижений в начале и конце движения по главному пути и содержат информацию о переходах маршрута с одной «нитки» графика на другую и порядке следования «ниток» графика по одному главному пути. Возможность такого тесного взаимодействия определяется тем, что множества используемых ресурсов (единиц

подвижного состава) и выполняемых работ («ниток» ГДП на конкретной линии метрополитена) имеют ограниченные мощности. Задачи замены единиц подвижного состава, закрепленных за конкретным маршрутом, в случае выхода из строя решаются сотрудниками депо.

Задача автоматизированного построения ГО решена несколькими способами:

- решение задачи о назначениях в классической формулировке фундаментальной задачи комбинаторной оптимизации, в ходе которого проблема возникает на стадии выбора критерия поддержания равномерности при ограниченных ресурсах [37];
- применение теории графов и принципа динамического программирования (планирования) Беллмана позволяет найти все варианты возможных назначений диагностических и ремонтных мероприятий, после чего производится выбор отвечающих плановым эксплуатационным показателям и минимально отличающихся от оптимального значения с точки зрения выбранного критерия. Реализация этого подхода требует много времени [20];
- применение генетических алгоритмов [38] позволяет эффективно и оперативно учитывать изменение условий при автоматизации планирования технического обслуживания электроподвижного состава метрополитена, использовать различные множества ресурсов, решать задачу в условиях недостаточных ресурсов, значительно сократить время решения поставленных задач, генерации большого числа допустимых вариантов [39] решения задачи при учете различных ограничений. На рис. 4 а, б приведены результаты, полученные для Калужско-Рижской линии Московского метрополитена [1, 8, 9].

4. Построение графика работы локомотивных бригад

Человеческий фактор наряду с состоянием инфраструктуры и подвижного состава является основным, влияющим на безопасность транспортных систем. Нарушение пропорции между периодами труда и отдыха (резкое

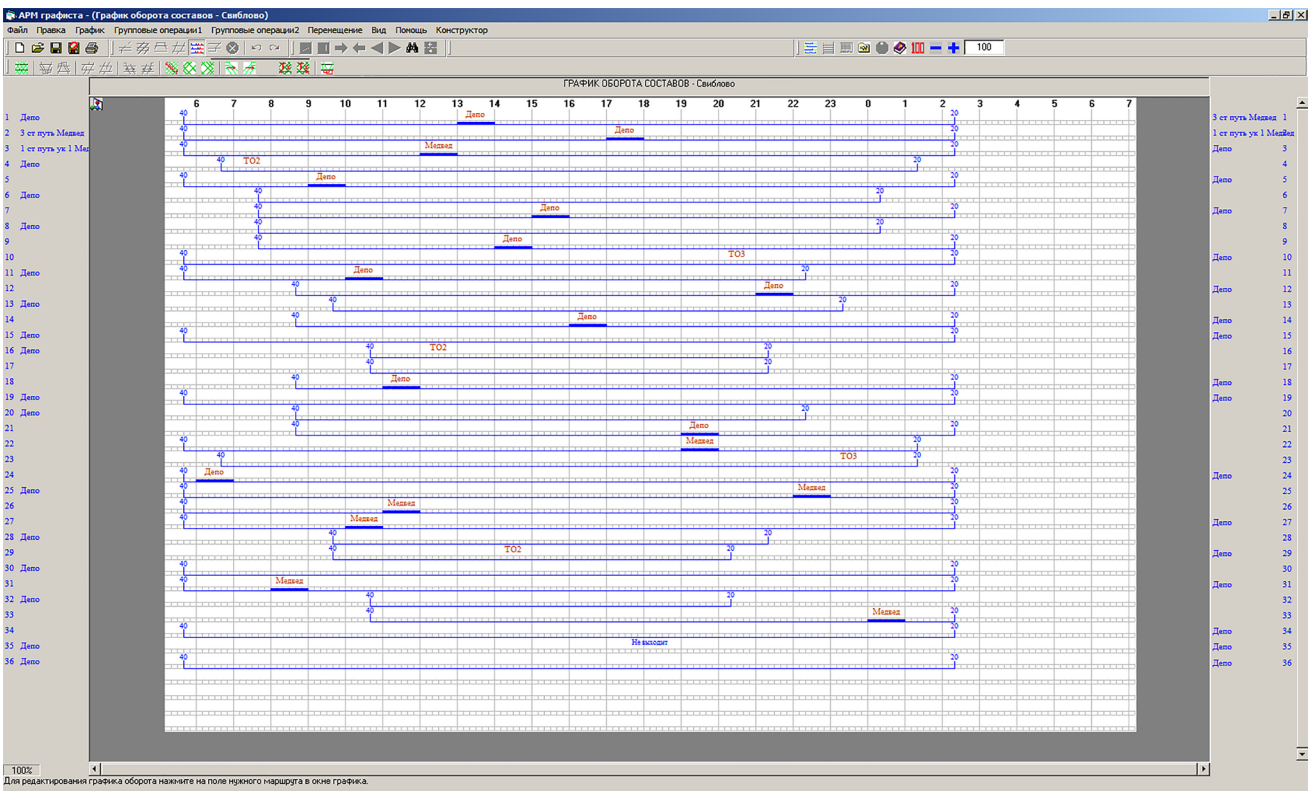
увеличение одного и сокращение другого, при этом в обе стороны) приводит к значительному увеличению частоты нарушений в работе машинистов. Это определяет актуальность задачи автоматизации построения ГР ЛБ, которая способствует повышению качества режима труда и отдыха. Использование стандартных средств управления персоналом [40] невозможно, так как смены сотрудников напрямую зависят не только от формальных требований к условиям труда, сформулированных в Трудовом кодексе РФ, Приказе Министерства транспорта РФ от 11 октября 2021 г. № 339 «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда отдельных категорий работников железнодорожного транспорта общего пользования, работа которых непосредственно связана с движением поездов» и Положении об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена, но и от ГДП. Работы, посвященные математическим аспектам планирования работы локомотивных бригад, имеют длительную историю [33, 41].

В настоящее время на железной дороге составление ГО производится вручную путем заполнения электронных таблиц. На кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) разработана интеллектуальная система планирования работы локомотивных бригад, реализующая автоматизированное построение ГР ЛБ (основных и подменных) как для условий метрополитена, так и условий МЦК с учетом локальных нормативных актов [1].

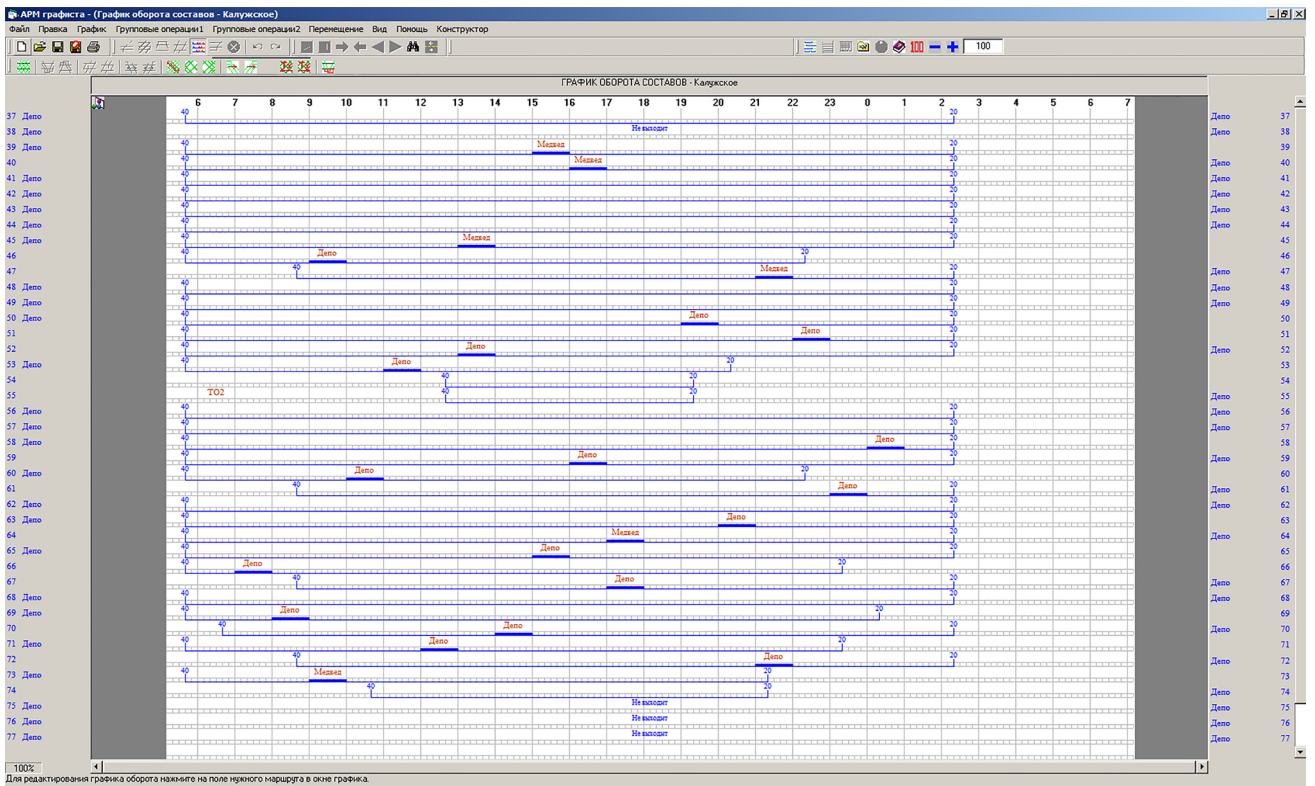
В системе реализованы рекурсивные алгоритмы назначения основных локомотивных бригад на рабочие смены и назначения обеденных перерывов основным локомотивным бригадам, которые позволяют повысить равномерность занятости бригады по сравнению с известными аналогами. Алгоритмы базируются на использовании теории графов и метода динамического программирования.

5. Управление перевозочным процессом

Организация и управление перевозочным процессом на любом виде транспорта заключается в выполнении комплекса сложных взаимосвязанных процессов с вовлечением широкого круга работников. От компетенций,



а



б

Рис. 4. ГО на Калужско-Рижской линии Московского метрополитена:
а — для депо «Свиблово»; б — для депо «Калужское»

знаний, практического опыта и навыков каждого работника зависит четкость, своевременность и правильность выполнения закрепленных за ними производственных процессов, а следовательно, безопасность и качество транспортных услуг.

Выполняя свои должностные обязанности, руководящие работники транспортной отрасли принимают управленческие решения различной сложности. В условиях штатной работы всех систем транспорта решения должны быть направлены на выполнение плановых заданий и показателей. Например, поездной диспетчер на железной дороге (ДНЦ) или поездной диспетчер линии метрополитена (ДЦХ) обеспечивают выполнение ГДП, обеспечивают выполнение заданий по использованию локомотивов, дают указания дежурным по станциям по организации движения поездов, планируют и организуют пропуск поездов, предоставление «окон», обеспечивают контроль поездной работы и т. д.

При возникновении сбоев в движении поездов или других нештатных ситуациях нагрузка на ДНЦ многократно возрастает — требуется оперативно принимать сложнейшие решения [42] для: организации перевозочного процесса в изменившихся условиях, обеспечения безопасности, восстановления движения поездов по нормативному ГДП и пр.

Учитывая разнообразие и сложность возможных нештатных ситуаций и то, что транспорт всегда остается объектом повышенной опасности, ДНЦ накапливает огромное количество вариантов и способов приведения ситуации к штатному режиму работы железнодорожного транспорта. При этом различные решения дают различный результат и эффект в различных случаях. Анализ каждой ситуации является личным профессиональным опытом определенного работника. Наиболее показательные и результативные мероприятия тиражируются в нормативных документах и специализированной литературе. Современный уровень развития информационных технологий позволяет накапливать, хранить и обрабатывать информацию о каждом случае, принятых решениях и их последствиях. Новая ступень развития технологий — интеллектуальные системы с возможностью самообучения и поддержкой принятия управленческих

решений [43, 44]. Необходимо создавать такие системы и использовать их потенциал для обеспечения бесперебойной, безопасной работы транспорта, особенно скоростного в городских агломерациях.

Научными и проектными организациями РФ, в том числе и на кафедре «Управление и защита информации», накоплен большой опыт в развитии централизованных и автономных автоматизированных систем управления движением поездов, в том числе разработана система поддержки принятия решения поездным диспетчером [1].

6. Фиксация данных и результатов перевозочного процесса в автоматизированных системах управления, их интеллектуальный анализ и принятие управленческих решений

Системы скоростного транспорта городских агломераций имеют развитые автоматизированные средства сбора и хранения информации о состоянии элементов инфраструктуры и подвижного состава, что позволяет строить ГИД в автоматическом режиме и в реальном времени [45, 46], определять отклонение текущего положения транспортных средств от планового, принимать управленческие решения и оценивать работоспособность отдельных элементов.

Анализ собранной информации в АСУ проводится как в режиме реального времени, так и апостериорно. На основе анализа информации, интегрированной из разных источников, возможно решение задач автоматизированного управления движением в сбойных ситуациях, сокращающих время восстановления планового движения, предиктивной диагностики, повышающих коэффициент технической готовности элементов инфраструктуры и подвижного состава [1].

7. Обучение

В настоящее время наиболее перспективным является интеграционный подход к обучению оперативных работников систем скоростного транспорта городских агломераций [47], при реализации которого тренажеры — автоматизированные системы обучения, основанные

на использовании имитационных моделей [48–51] соответствующих транспортных систем, и автоматизированные системы обучения, реализующие тестовую форму обучения, существуют в едином методическом, информационном и программном пространстве.

По целевой аудитории широко распространенные автоматизированные системы обучения можно разделить на следующие классы:

- тренажеры машинистов и базирующиеся на их основе обучающие комплексы [52];
- тренажеры станционных диспетчеров [53–55];
- тренажеры поездных диспетчеров [47, 42];
- тренажеры персонала, непосредственно не связанного с управлением движением, но реализующего действия по обслуживанию инфраструктуры, например, операторов строительной техники [56, 57].

Отличительной чертой средств обучения поездных диспетчеров систем скоростного транспорта городских агломераций является то, что функционал поездных и станционных диспетчеров выполняют одни и те же люди, а значит, и тренажеры основаны на использовании имитационной модели, симулирующей движение всей совокупности подвижного состава по всей инфраструктуре, например, линии метрополитена или МЦК. Кафедра «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) в 1999 г. разработала и внедрила первый в мире тренажер поездного диспетчера линии метрополитена. Такие тренажеры разработаны для всех линий Московского метрополитена [47] и могут быть адаптированы для условий МЦК.

Важно отметить, что подобные тренажеры являются прекрасными полигонами для исследования современных алгоритмов централизованного интеллектуального управления движением скоростного транспорта городских агломераций.

Заключение

Анализ опыта создания и использования средств автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций показал наиболее перспективные направления их развития, к которым относится интеллектуализация подобных средств на основе накопленных баз знаний.

Комплексный подход к решению задач автоматизированного управления объектами разных типов, непосредственно связанных с организацией движения, с использованием технологий искусственного интеллекта и больших данных *повысит*:

- эффективность использования множества выделенных ресурсов (человеческих и инфраструктурных);
- процент выполнения ГДП;
- качество и объективность принимаемых управленческих решений;
- скорость реакции на изменяющиеся условия работы транспортной системы;
- скорость обмена информацией между средствами цифровизации, поддерживающих технологические процессы транспортной системы и смежных организаций;
- производительность труда сотрудников, решающих соответствующие задачи анализа и управления;

уменьшит:

- количество ошибок, возникающих при передаче информации;
- влияние негативного человеческого фактора на принимаемые управленческие решения и безопасность движения;
- производственные издержки.

Цель статьи можно считать достигнутой. Выявление общих и отличительных черт скоростных городских транспортных систем, анализ накопленного опыта автоматизации в области управления перевозочным процессом позволили определить перспективные направления и базу для их развития:

- развитие информационного, математического и программного обеспечения автоматизированного построения ГДП для скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий на базе системы «АРМ Графиста»;
- создание интеллектуальной системы планирования работы локомотивных бригад скоростных городских транспортных систем на базе прототипа программного обеспечения, созданного на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ);
- синтез и апробация интеллектуальных алгоритмов централизованного беспре-

- лотного энергооптимального управления движением поездов с прогнозированием возмущений и использованием ранее не задействованных ресурсов управляющих воздействий;
- адаптация тренажера поездного диспетчера линий метрополитена для условий МЦК с возможностью последующего расширения условий применения на базе модульного принципа построения;
- разработка интеллектуальной системы оценки состояния оборудования моторвагонного скоростного и высокоскоростного подвижного состава на основе накопленной теоретической базы решения задач предиктивной диагностики. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. — М.: РУТ (МИИТ), 2021. — С. 56–64.
2. Вакуленко С. П. Разработка вариантов модернизации Московской монорельсовой транспортной системы / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, В. А. Мнацаканов и др. // Метро и тоннели. — 2020. — № 4. — С. 28–36.
3. Shevlyugin M. V. Electric stock digital twin in a subway traction power system / M. V. Shevlyugin, A. A. Korolev, A. E. Golitsyna et al. // Russian Electrical Engineering. — 2019. — Vol. 90. — Iss. 9. — Pp. 647–652. — DOI: 10.3103/S1068371219090098.
4. Zhou W. Passenger Flow Forecasting in Metro Transfer Station Based on the Combination of Singular Spectrum Analysis and AdaBoost-Weighted Extreme Learning Machine / W. Zhou, W. Wang, D. Zhao // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Iss. 12. — Pp. 1–23. — DOI: 10.3390/s20123555.
5. Пазойский Ю. О. Выбор оптимальных параметров системы освоения пассажиропотоков в дальнем сообщении на железнодорожном транспорте / Ю. О. Пазойский, О. Н. Панова // Автоматизация и современные технологии. — 2008. — № 1. — С. 34–39.
6. Пазойский Ю. О. Максимизация числа пассажирских поездов дальнего следования в период роста пассажиропотоков за счет интенсификации использования составов поездов / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, А. П. Батулин // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. — 2016. — № 9-1(23). — С. 166–171.
7. Пазойский Ю. О. Схематический график движения пригородных поездов по выходным дням / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 6(73). — С. 140–147.
8. Исакаков Т. А. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Исакаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко и др. // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 38–63. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.
9. Сафронов А. И. Антология задач организации графического пользовательского интерфейса в интеллектуальной системе «АРМ графиста» / А. И. Сафронов, У. А. Старовойтова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 326–337.
10. Копылова Е. В. Технология организации пригородного пассажиропотока / Е. В. Копылова, П. А. Козлов, О. В. Осокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3. — С. 109–117.
11. Исакаков Т. А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортным узлом / Т. А. Исакаков // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 3. — С. 79–89.
12. Abdul Ghani N. An Alternative Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows for Daily Deliveries / N. Abdul Ghani, S. Shariff, S. Zahari // Advances in Pure Mathematics. — 2016. — Iss. 6. — Pp. 342–350. — DOI: 10.4236/apm.2016.65025.
13. Вакуленко С. П. Оценка целесообразности формирования логистических систем обслуживания пассажиров / С. П. Вакуленко, Е. В. Копылова, А. Ю. Белянкин // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 2(57). — С. 122–128.
14. Копылова Е. В. Методические подходы к оценке влияния требований пассажиров к качеству транспортного обслуживания на технологию работы железнодорожного транспорта / Е. В. Копылова, М. А. Туманов // Транспортное дело России. — 2018. — № 4. — С. 178–181.
15. Копылова Е. В. Научные подходы к обеспечению качества обслуживания пассажиров при организации мультимодальных пассажирских перевозок / Е. В. Копылова, С. П. Вакуленко // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 6. — С. 21–26.
16. Роменский Д. Ю. Постановка задачи выбора мест расположения и емкости путей отстоя составов пригородных и пригородно-городских электропоездов / Д. Ю. Роменский // Наука и техника транспорта. — 2020. — Т. 1. — С. 60–65.
17. Ho T. K. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization / T. K. Ho, C. W. Tsang, K. H. Ip et al. // Expert System Applications. — 2012. — Vol. 39. — Pp. 861–868.
18. Быков В. П. Теоретические и методологические основы построения систем поддержки принятия решений при управлении движением поездов на участках железных дорог / В. П. Быков. — Хабаровск: ДВГУПС, 1999. — 135 с.
19. Казаков А. Л. Применение онтологического подхода для создания интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте / А. Л. Казаков, А. В. Дудакова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3(43). — С. 33–41. — DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-33-41.

20. Баранов Л. А. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. — 1981. — № 2. — С. 17–20.
21. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды Международной конференции «Транспорт XXI век». — Варшава, 2001.
22. Логинова Л. Н. Разработка аналитического алгоритма составления расписания движения поездов метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2022. — С. 221–225.
23. Логинова Л. Н. Математические методы и основные принципы организации транспортных перевозок / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Транспортное дело России. — 2021. — № 4. — С. 84–87.
24. Феофилов А. Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1991. — № 7. — С. 10–13.
25. Chaudhry I. A. Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms / I. A. Chaudhry, M. Usman // Tehnicki Vjesnik. — 2017. — Iss. 24(5). — Pp. 1401–1409. — DOI: 10.17559/TV-20151121212910.
26. Chavhan S. Prediction based traffic management in a metropolitan area / S. Chavhan, P. Venkataram // Journal of traffic and transportation engineering. — 2020. — Vol. 7. — Iss. 4. — Pp. 447–466. — DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.003.
27. Aguado J. A. Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems / J. A. Aguado, A. J. Sanchez-Racero, S. De la Torre // IEEE Transactions on Smart Grid. — 2018. — Vol. 9. — Iss. 2. — Pp. 993–1001. — DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
28. Liu P. A robust and energy-efficient train timetable for the subway system / P. Liu, M. Schmidt, Q. Kong et al. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 121(2). — Pp. 102822–102849. — DOI: 10.1016/j.trc.2020.102822.
29. Wang P. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling / P. Wang, R. M. Goverde // European Journal of Operational Research. — 2019. — Vol. 272. — Pp. 621–635. — DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.034.
30. Haładyn S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure. A Case Study / S. Haładyn // Energies. — 2021. — Iss. 14(16). — Pp. 8248–8260. — DOI: 10.3390/en14164781.
31. Baranov L. A. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction / L. A. Baranov, V. G. Sidorenko, E. P. Balakina et al. // Russian Electrical Engineering. — 2021. — Vol. 92. — Iss. 9. — Pp. 492–498. — DOI: 10.3103/S1068371221090030.
32. Николаев К. Ю. Применение технологии «трамвай — поезд» в России. Требования к подвижному составу и технологическое обеспечение взаимодействия транспортных систем / К. Ю. Николаев // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года. — Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. — С. 132–138.
33. Пазойский Ю. О. Автоматизация расчета графика работы поездных бригад в пригородном сообщении / Ю. О. Пазойский, С. А. Бывшев; под общ. ред. Ф. П. Кочнева // Межвузовский сборник научных трудов «Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог». — 1981. — № 657. — С. 84–90.
34. Пазойский Ю. О. Организация пригородных железнодорожных перевозок: Транспортные средства. Эксплуатация железных дорог / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, А. В. Колин. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. — 270 с.
35. Копылова Е. В. Оптимизация оборота составов по обеспечению ниток графика пригородного движения / Е. В. Копылова, П. А. Козлов // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 2. — С. 68–73.
36. Козлов П. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663049 Российская Федерация. Система оптимального управления оборотом поездных локомотивов «Лабиринт»: № 2015619810: заявл. 15.10.2015: опубл. 09.12.2015 / П. А. Козлов, И. В. Иванов, А. А. Каляганов; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Аналитические и управляющие системы на транспорте “Транспортный алгоритм”».
37. Жербина А. И. Расчет на ЭВМ графика оборота составов метрополитена / А. И. Жербина // Межвузовский сборник. — 1980. — № 612. — С. 105–109.
38. Guler H. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms / H. Guler // Gradevinar. — 2016. — Vol. 68. — Iss. 12. — Pp. 979–993. — DOI: 10.14256/JCE.1458.2015.
39. Ghofrani, F. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey / F. Ghofrani, Q. He, R. Goverde et al. // Transportation Research Part C Emerging Technologies. — 2018. — Iss. 90. — Pp. 226–246. — DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.010.
40. Reva O. Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATC) personnel / O. Reva, S. Borsuk, V. Shulgin et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 964. — Pp. 783–793. — DOI: 10.1007/978-3-030-20503-470/.
41. Бархатный В. Д. Рациональное использование технических средств и персонала в условиях внутрисуточной неравномерности и спада перевозок / В. Д. Бархатный, Ю. С. Генералов, Д. В. Смирнов // Вестник ВНИИЖТ. — 1997. — № 4. — С. 3–7.
42. Luteberget B. Design-Time Railway Capacity Verification using SAT modulo Discrete Event Simulation / B. Luteberget, K. Claessen, C. Johansen // Proceedings of the 2018 18th conference on formal methods in computer aided design (FMCAD). — Austin, 2019. — Pp. 188–196. — DOI: 10.23919/FMCAD.2018.8603003.
43. Gan T. H. Industry 4.0: Why Machine Learning Matters? / T. H. Gan, J. Kanfoud, H. Nedunuri et al. // Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring. — 2021. — Pp. 397–404. — DOI: 10.1007/978-981-15-9199-0_37.
44. Pappaterra M. J. A Systematic Review of Artificial Intelligence Public Datasets for Railway Applications / M. J. Pappaterra, F. Flammini, V. Vittorini et al. // Infrastructures. — 2021. —

- Vol. 6. — Iss. 10. — Pp. 136. — DOI: 10.3390/infrastructures6100136.
45. Чумаков В. М. Автоматизация процесса анализа графика исполненного движения поездов и качества поездной работы в центре управления перевозками / В. М. Чумаков, О. В. Млявая // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: материалы Международной научно-практической конференции, Гомель, 10–11 декабря 2020 года. Под общ. ред. А. А. Ерофеева. — Гомель: учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2021. — С. 413–417.
 46. Бариев М. Ф. Взаимодействие информационных систем в мониторинге графика движения поездов на МЦД / М. Ф. Бариев, Р. А. Воротняк // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 12. — С. 12–13. — DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.003.
 47. Баранов Л. А. Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 2. — С. 22–31.
 48. Pokusaev O. On Digital Twin for Metro System / O. Pokusaev, A. Checkmarev, D. Namiot // Proceedings of 19th IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTs'2021). September 10–13, 2021. — Batumi, 2021. — Pp. 114–118. — DOI: 10.1109/EWDTs52692.2021.9581028.
 49. Wang X. Digital twin Based Validation Platform for Smart Metro Scenarios / X. Wang, H. Song, W. Zha et al. // 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). — 15 July — 15 Aug. 2021. — Beijing, 2021. — Pp. 386–389. — DOI: 10.1109/DTPI52967.2021.9540161.
 50. Bao L. Review of digital twin for intelligent transportation system / L. Bao, Q. Wang, Y. Jiang // International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT). — 2021. — Pp. 309–315. — DOI: 10.1109/ICEERT53919.2021.00064.
 51. Ali W. A. Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review / W. A. Ali, M. Roccotelli, M. P. Fanti // Conference: 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). — Istanbul, 2022. — DOI: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804017.
 52. Гапанович В. А. Патент на полезную модель № 130113 U1 Российская Федерация, МПК G09B 9/05. Мобильный учебный демонстрационный комплекс: № 2012126762/11: заявл. 27.06.2012; опубл. 10.07.2013 / В. А. Гапанович, Ю. И. Попов, В. В. Власов и др.; заявитель открытое акционерное общество «Российские железные дороги».
 53. Козлов П. А. Интеллектуальный тренажер для профессиональной подготовки диспетчеров / П. А. Козлов, В. А. Четвериков, И. М. Яриков // Железнодорожный транспорт. — 2011. — № 10. — С. 29–32.
 54. Козлов П. А. Интеллектуальный тренажер для диспетчеров / П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10. — № 3(41). — С. 180–183.
 55. Зеленцов Л. Б. Применение симулятора-тренажера при подготовке и переподготовке специалистов в сфере управления инвестиционно-строительными проектами / Л. Б. Зеленцов, Д. В. Пирко, И. А. Алаамери и др. // Строительное производство. — 2022. — № 1. — С. 50–54. — DOI: 10.54950/26585340_2022_1_50.
 56. Великанов В. С. Тренажерная подготовка кадров для горной промышленности как системообразующий фактор в сфере обеспечения эффективной эксплуатации горного оборудования / В. С. Великанов, К. В. Исмагилов, А. А. Шабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 52. — С. 153–158.
 57. Габдуллин Т. Р. Разработка обучающих тренажеров для дорожно-строительных машин / Т. Р. Габдуллин // Техника и технология транспорта. — 2018. — № 4(9). — С. 2.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 33–48
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48

Experience and Perspectives of Transportation Process Control Automation for Rapid-Transit Transport of Urban Agglomerations

Information about authors

Sidorenko V. G., Doctor in Engineering, Professor, Department Professor¹. E-mail: valenfalk@mail.ru

Kopylova E. V., Doctor of Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor². E-mail: miit.kopylova@yandex.ru

Safronov A. I., PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor¹. E-mail: safronov-ai@mail.ru

Tumanov M. A., Senior Lecturer². E-mail: miit.tumanov@yandex.ru

¹Russia University of Transport (MIIT), “Control and Information Security” Department, Moscow

²Russia University of Transport (MIIT), “Transport Business Management and Intelligent Systems” Department, Moscow

Abstract: The article analyses the technological process of transportation process organization and its control in different systems of urban agglomeration rapid-transit transport. It is presented the generalization of organization technological schemes of transportation process at the compilation of normative documents-schedules of: train

traffic, rolling stock turnover, work of locomotive teams. Common features, allowing to share automation and digitization positive experience from one transport systems to another, are revealed. As a typical example for urban agglomeration rapid-transit transport, the work of Moscow Central Ring in data flow diagram notation is considered. It has been shown that the conditions of traffic planning on Moscow Central Ring are analogous to active ones on the subway ring lines. As generalizing notions, there are: mixing, non-parallelism, zoning, non-autonomy. Corresponding illustrative examples are given. Congested experience in the sphere of control automation for transportation process of rapid-transit transport of urban agglomeration is considered on the examples of railway section Nizhniy Novgorod – Uren’ as well as Kaluzhsko-Rizhskaya line of Moscow subway (electrodepos “Kaluzhskoye” and “Sviblovo”). The article describes initial data sets for to perform train traffic schedule, the purpose of its performance has been formulated, limitations, reflecting the links between objects, inside the set of given resources, and limitations, being defined by rules of passenger service, have been revealed. Analysis, pursued in the article, has shown the perspective directions of automated transport systems development on knowledge accumulated bases. As a result of the application of complex approach to the solution of automated control tasks at the use of artificial intelligence technologies and big databases usage, it’s planned to increase the efficiency usage for given resources set, train traffic schedule implementation percentage and others; to reduce information transfer error number as well as those, appeared as a result of negative human factor influence and so on.

Keywords: rapid-transit transport; urban agglomeration; train traffic schedule; turnout schedule; work schedule of locomotive teams; operative control; personnel training; database; exerciser; knowledge database.

References

- Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. *Kompleksnoe reshenie zadach planirovaniya i upravleniya dvizheniem gorodskikh rel'sovykh transportnykh sredstv. Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov — osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu universiteta, Moskva, 22 oktyabrya 2021 goda* [Complex solution of problems of planning and traffic control of urban rail vehicles. Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the University, Moscow, October 22, 2021]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2021, pp. 56–64. (In Russian)
- Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mnatsakanov V. A. et al. *Razrabotka variantov modernizatsii Moskovskoy monorel'sovoy transportnoy sistemy* [Development of options for the modernization of the Moscow monorail transport system, Metro and Tunnels]. *Metro i tonneli* [Metro and Tunnels]. 2020, Iss. 4, pp. 28–36. (In Russian)
- Shevlyugin M. V., Korolev A. A., Golitsyna A. E. et al. *Electric stock digital twin in a subway traction power system*. *Russian Electrical Engineering*. 2019, vol. 90, Iss. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/S1068371219090098.
- Zhou W., Wang W., Zhao D. *Passenger Flow Forecasting in Metro Transfer Station Based on the Combination of Singular Spectrum Analysis and AdaBoost-Weighted Extreme Learning Machine*. *Sensors*. 2020, vol. 20, Iss. 12, pp. 1–23. DOI: 10.3390/s20123555.
- Pazoyskiy Yu. O., Panova O. N. *Vybor optimal'nykh parametrov sistemy osvoeniya passazhiropotokov v dal'nem soobshchenii na zheleznodorozhnom transporte* [Choice of optimal parameters for the system of development of passenger traffic in long-distance communication on railway transport]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technologies]. 2008, Iss. 1, pp. 34–39.
- Pazoyskiy Yu. O., Savel'ev M. Yu., Baturin A. P. *Maksimizatsiya chisla passazhirkikh poezdov dal'nego sledovaniya v period rosta passazhiropotokov za schet intensivifikatsii ispol'zovaniya sostavov poezdov* [Maximization of the number of long-distance passenger trains during the growth of passenger traffic due to the intensification of the use of train sets]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economics, science, technology]. 2016, Iss. 9-1(23), pp. 166–171. (In Russian)
- Pazoyskiy Yu. O., Savel'ev M. Yu. *Skhematicheskiy grafik dvizheniya prigorodnykh poezdov po vykhodnym dnyam* [Schematic schedule of suburban trains on weekends]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, vol. 15, Iss. 6(73), pp. 140–147. (In Russian)
- Iskakov T. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. et al. *Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniem passazhirkikh poezdov metropolitena* [Approaches to assessing the quality of planning and traffic control for metro passenger trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 1, pp. 38–63. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63. (In Russian)
- Safronov A. I., Starovoytova U. A. *Antologiya zadach organizatsii graficheskogo pol'zovatel'skogo interfeysa v intellektual'noy sisteme "ARM grafista"*. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [An anthology of tasks of organizing a graphical user interface in the intellectual system "Workstation of a graphist"]. *Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference*. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 326–337. (In Russian)
- Kopylova E. V., Kozlov P. A., Osokin O. V. *Tekhnologiya organizatsii prigorodnogo passazhiropotoka* [Technology of organization of suburban passenger traffic]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2019, Iss. 3, pp. 109–117. (In Russian)
- Iskakov T. A. *Model' povedeniya razlichnykh klientskikh grupp v sisteme upravleniya transportnogo uzla* [A model of the behavior of various client groups in the control system of a transport hub]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 3, pp. 79–89. (In Russian)
- Abdul Ghani N., Shariff S., Zahari S. *An Alternative Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows for Daily Deliveries*. *Advances in Pure Mathematics*. 2016, Iss. 6, pp. 342–350. DOI: 10.4236/apm.2016.65025.
- Vakulenko S. P., Kopylova E. V., Belyankin A. Yu. *Otsenka tselesoobraznosti formirovaniya logisticheskikh sistem obsluzhivaniya passazhirov* [Evaluation of the feasibility of the formation of logistics systems for servicing passengers]. *Mir transporta* [World of transport]. 2015, vol. 13, Iss. 2(57), pp. 122–128. (In Russian)
- Kopylova E. V., Tumanov M. A. *Metodicheskie podkhody k otsenke vliyaniya trebovaniy passazhirov k kachestvu transportnogo obsluzhivaniya na tekhnologiyu raboty zheleznodorozhnogo transporta* [Methodological approaches to assessing the impact of passenger requirements on the quality of transport services on the technology of railway transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, Iss. 4, pp. 178–181. (In Russian)
- Kopylova E. V., Vakulenko S. P. *Nauchnye podkhody k obespecheniyu kachestva obsluzhivaniya passazhirov pri organizatsii mul'timodal'nykh passazhirkikh perevozok* [Scientific approaches to ensuring the quality of passenger service in the organization of multimodal passenger transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2018, Iss. 6, pp. 21–26. (In Russian)
- Romenskiy D. Yu. *Postanovka zadachi vybora mest raspolozheniya i emkosti putey otstoya sostavov prigorodnykh i prigorodno-gorodskikh elektropoezdov* [Statement of the problem of choosing the location and capacity of the sludge tracks of suburban and suburban-urban electric trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, vol. 1, pp. 60–65. (In Russian)
- Ho T. K., Tsang C. W., Ip K. H. et al. *Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization*. *Expert System Applications*. 2012, vol. 39, pp. 861–868.
- Bykov V. P. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii dvizheniem poezdov na uchastkakh zheleznykh dorog* [Theoretical and methodological foundations for constructing decision support systems in the management of train traffic on sections of railways]. *Khabarovsk: DVGUPS Publ.*, 1999, 135 p. (In Russian)
- Kazakov A. L., Dudakova A. V. *Primenenie ontologicheskogo podkhoda dlya sozdaniya intellektual'noy sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Application of the ontological approach to create an intelligent control system for railway transport]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2019, Iss. 3(43), pp. 33–41. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-3-33-41. (In Russian)
- Baranov L. A., Zherbina A. I. *Postroenie na EVM grafikov dvizheniya poezdov metropolitena* [Construction of metro train schedules on a computer]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1981, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
- Vasilenko M. N., Degtyarev D. P., Maksimenko O. A. *Avtomaticheskoe postroenie grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene*. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Transport XXI vek"* [Automatic scheduling of trains on the subway. Proceedings of the International Conference "Transport XXI century"]. *Varshava*, 2001. (In Russian)
- Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Razrabotka analiticheskogo algoritma sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov metropolitena*. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Development of an analytical algorithm for scheduling the movement of metro trains. Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 221–225. (In Russian)
- Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Matematicheskie metody i osnovnye printsipy organizatsii transportnykh perevozok* [Mathematical methods and basic principles of organization of transportation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 4, pp. 84–87. (In Russian)
- Feofilov A. N. *Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poezdov na liniyakh metropolitena* [Mathematical model for scheduling trains on metro lines]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1991, Iss. 7, pp. 10–13. (In Russian)
- Chaudhry I. A., Usman M. *Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms*. *Tekhnicheskij Vjesnik*. 2017, Iss. 24(5), pp. 1401–1409. DOI: 10.17559/TV-20151121212910.
- Chavhan S., Venkataram P. *Prediction based traffic management in a metropolitan area*. *Journal of traffic and transportation engineering*. 2020, vol. 7, Iss. 4, pp. 447–466. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.003.
- Aguado J. A., Sanchez-Racero A. J., Torre de la S. *Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems*. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018, vol. 9, Iss. 2, pp. 993–1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
- Liu R., Schmidt M., Kong Q. et al. *A robust and energy-efficient train timetable for the subway system*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020, vol. 121(2), pp. 102822–102849. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102822.

29. Wang P., Goverde R. M. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling. *European Journal of Operational Research*. 2019, vol. 272, pp. 621–635. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.034.
30. Haładyn S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure. A Case Study. *Energies*. 2021, Iss. 14(16), pp. 8248–8260. DOI: 10.3390/en14164781.
31. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, Iss. 9, pp. 492–498. DOI: 10.3103/S1068371221090030.
32. Nikolaev K. Yu. *Primenenie tekhnologii "tramvay — poezd" v Rossii. Trebovaniya k podvizhnomu sostavu i tekhnologicheskoe obespechenie vzaimodeystviya transportnykh sistem. Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii AO "VNIIZhT", Shcherbinka, 26–27 avgusta 2021 goda* [Application of "tram — train" technology in Russia. Requirements for rolling stock and technological support for the interaction of transport systems. Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: a collection of materials of the scientific and practical conference of VNIIZhT JSC, Shcherbinka, August 26–27, 2021]. Shcherbinka: AO "VNIIZhT" Publ., 2021, pp. 132–138. (In Russian)
33. Pazoyskiy Yu. O., Byvshev S. A. *Avtomatizatsiya rascheta grafika raboty poezdnykh brigad v prigorodnom soobshchenii. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Optimizatsiya ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog"; pod obshch. red. F. P. Kochneva* [Automation of the calculation of the work schedule of train crews in suburban traffic. Interuniversity collection of scientific papers "Optimization of the operational work of railways"; ed. F. P. Kochnev]. 1981, Iss. 657, pp. 84–90. (In Russian)
34. Pazoyskiy Yu. O., Vakulenko S. P., Kolin A. V. *Organizatsiya prigorodnykh zheleznodorozhnykh perezovok: Transportnye sredstva. Eksploatatsiya zheleznykh dorog* [Organization of commuter rail transportation: Vehicles. Railway operation]. M.: FGBU DPO "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2015, 270 p. (In Russian)
35. Kopylova E. V., Kozlov P. A. *Optimizatsiya oborota sostavov po obespecheniyu nitok grafika prigorodnogo dvizheniya* [Optimization of the turnover of trains to ensure the threads of the suburban traffic schedule]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, Iss. 2, pp. 68–73. (In Russian)
36. Kozlov P. A., Ivanov I. V., Kalyaganov A. A. *Sistema optimal'nogo upravleniya oborotom poezdnykh lokomotivov "Labyrinth"* [The system for optimal control of the turnover of train locomotives "Labyrinth"]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2015619810. (In Russian)
37. Zherbina A. I. *Raschet na EVM grafika oborota sostavov metropolitena* [Calculation on the computer of the schedule of turnover of subway trains]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. 1980, Iss. 612, pp. 105–109. (In Russian)
38. Guler H. *Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms*. *Gradevinar*. 2016, vol. 68, Iss. 12, pp. 979–993. DOI: 10.14256/JCE.1458.2015.
39. Ghofrani F., He Q., Goverde R. et al. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. 2018, Iss. 90, pp. 226–246. DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.010.
40. Reva O., Borsuk S., Shulgina V. et al. Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATS) personnel. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 964, pp. 783–793. DOI: 10.1007/978-3-030-20503-470/.
41. Barkhatnyy V. D., Generalov Yu. S., Smirnov D. V. *Ratsional'noe ispol'zovanie tekhnicheskikh sredstv i personala v usloviyakh vnutrisutochnoy neravnomernosti i spada perezovok* [Rational use of technical means and personnel in the conditions of intraday unevenness and decline in traffic]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1997, Iss. 4, pp. 3–7. (In Russian)
42. Luteberget B., Claessen K., Johansen C. *Design-Time Railway Capacity Verification using SAT modulo Discrete Event Simulation*. Proceedings of the 2018 18th conference on formal methods in computer aided design (FMCAD). Austin, 2019, pp. 188–196. DOI: 10.23919/FMCAD.2018.8603003.
43. Gan T. H., Kanfoud J., Nedunuri H. et al. *Industry 4.0: Why Machine Learning Matters?* *Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring*. 2021, pp. 397–404. DOI: 10.1007/978-981-15-9199-0_37.
44. Pappaterra M. J., Flammini F., Vittorini V. et al. *A Systematic Review of Artificial Intelligence Public Datasets for Railway Applications*. *Infrastructures*. 2021, vol. 6, Iss. 10, pp. 136. DOI: 10.3390/infrastructures6100136.
45. Chumakov V. M., Mlyavaya O. V. *Avtomatizatsiya protsessa analiza grafika ispol'nennogo dvizheniya poezdov i kachestva poezdnoy raboty v tsentre upravleniya perezovkami. Tikhomirovskie chteniya: Sinergiya tekhnologii perezovozhnogo protsessa: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Gomel', 10–11 dekabrya 2020 goda. Pod obshch. red. A. A. Erofeeva* [Automation of the process of analyzing the schedule of completed train traffic and the quality of train work in the transportation control center]. Gomel': uchrezhdenie obrazovaniya "Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta" Publ., 2021, pp. 413–417. (In Russian)
46. Bariev M. F., Vorotnyak R. A. *Vzaimodeystvie informatsionnykh sistem v monitoringe grafika dvizheniya poezdov na MTSd* [Interaction of information systems in monitoring the train schedule on the MCD]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2020, Iss. 12, pp. 12–13. DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.003. (In Russian)
47. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. *Integratsionnyy podkhod v obuchenii operativnykh rabotnikov gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem* [Integration approach in training operational workers of urban rail transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, Iss. 2, pp. 22–31. (In Russian)
48. Pokusaev O., Checkmarev A., Namiot D. *On Digital Twin for Metro System*. Proceedings of 19th IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS'2021). September 10–13, 2021. Batumi, 2021, pp. 114–118. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581028. (In Russian)
49. Wang X., Song H., Zha W. et al. *Digital twin Based Validation Platform for Smart Metro Scenarios*. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). 15 July — 15 Aug. 2021. Beijing, 2021. Pp. 386–389. DOI: 10.1109/DTPIS2967.2021.9540161.
50. Bao L. *Review of digital twin for intelligent transportation system* / L. Bao, Q. Wang, Y. Jiang // *International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*. 2021, pp. 309–315. DOI: 10.1109/ICEERT53919.2021.00064.
51. Ali W. A., Roccotelli M., Fanti M. P. *Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review*. Conference: 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Istanbul, 2022. DOI: 10.1109/CoDIT5151.2022.9804017.
52. Gapanovich V. A., Popov Yu. I., Vlasov V. V. et al. *Mobil'nyy uchebnyy demonstratsionnyy kompleks* [Mobile training demonstration complex]. Patent RF, no. 2012126762/11, 2013. (In Russian)
53. Kozlov P. A., Chetverikov V. A., Yarikov I. M. *Intellektual'nyy trenazher dlya professional'noy podgotovki dispatcherov* [Intelligent simulator for professional training of dispatchers]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2011, Iss. 10, pp. 29–32. (In Russian)
54. Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. *Intellektual'nyy trenazher dlya dispatcherov* [Intelligent simulator for dispatchers]. *Mir transporta* [World of transport]. 2012, vol. 10, Iss. 3(41), pp. 180–183. (In Russian)
55. Zelentsov L. B., Pirkov D. V., Alaameri I. A. et al. *Primenenie simulyatora-trenazhera pri podgotovke i perepodgotovke spetsialistov v sfere upravleniya investitsionno-stroitel'nymi proektami* [The use of a simulator in the training and retraining of specialists in the field of management of investment and construction projects]. *Stroitel'noe proizvodstvo* [Construction production]. 2022, Iss. 1, pp. 50–54. DOI: 10.54950/26585340_2022_1_50. (In Russian)
56. Velikanov V. S., Ismagilov K. V., Shabanov A. A. *Trenazhernaya podgotovka kadrov dlya gornoy promyshlennosti kak sistemoobrazuyushchiy faktor v sfere obespecheniya effektivnoy ekspluatatsii gornogo oborudovaniya* [Simulator training of personnel for the mining industry as a system-forming factor in the field of ensuring the efficient operation of mining equipment]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2012, Iss. S2, pp. 153–158. (In Russian)
57. Gabdullin T. R. *Razrabotka obuchayushchikh trenazherov dlya dorozhno-stroitel'nykh mashin* [Development of training simulators for road-building machines]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Technique and technology of transport]. 2018, Iss. 4(9), p. 2. (In Russian)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ГОРОДСКОЙ РЕЛЬСОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

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

САФРОНОВ Антон Игоревич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: safronov-ai@mail.ru

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

В статье исследована возможность применения генетических алгоритмов при автоматизации составления плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена. Основная цель исследования — усовершенствовать автоматизированную систему составления планового графика движения пассажирских поездов для обеспечения равномерности процессов при использовании разнообразных ресурсов и учете существующих ограничений. Необходимые определения ресурсов и ограничений под условия использования модели генетического алгоритма сведены во взаимосвязанные и унифицированные таблицы. На основе вероятностного подхода исследовано влияние различных сочетаний значений параметров генетического алгоритма на состав популяции в процессе поиска эффективных результатов планирования перевозочного процесса городской рельсовой транспортной системы. Для нужд исследования составлено программное обеспечение на высокоуровневых языках *C#* и *Python*. Выполнена адаптация генетического алгоритма к решению задачи автоматизации составления плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена, и показана его применимость к комплексу взаимосвязанных задач автоматизации планирования перевозочного процесса: составлению графика оборота электроподвижного состава и графика работы локомотивных бригад. Рассчитаны значения вероятности получения благоприятного исхода — наличия в результатах автоматизированного составления плановых графиков движения поездов всех возможных значений аллелей при различных комбинациях значений размера первичной популяции и требуемого количества аллелей.

Ключевые слова: генетический алгоритм; фитнес-функция; критерии равномерности; размер первичной популяции; *Python*; городская рельсовая транспортная система; график движения поездов; планирование перевозочного процесса.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62

▼ Введение

Поддержание высокой интенсивности движения, обеспечение безопасности движения транспортных средств городской рельсовой транспортной системы (ГРТС), соблюдение правил комфортного обслуживания пассажиров и эффективное использование производственных ресурсов базируются на комплексном подходе к решению задач планирования перевозочного процесса.

В условиях интенсивного движения транспортных средств с учетом высоких приоритетов в сфере обеспечения безопасных перевозок при бесперебойной работе единой ГРТС важно отвечать всем запросам на сервис и комфорт, поступающим от пассажиров. ГРТС включают в себя метрополитен, моно-рельсовые системы, участки пригородного

железнодорожного движения, скоростной трамвай. На сегодняшний день комплексное решение задач планирования безопасных перевозок на ГРТС немыслимо и неэффективно без применения интеллектуальных информационных технологий [1], направленных на рационализацию использования имеющихся и ограниченных производственных ресурсов при планировании перевозочного процесса.

Результатами планирования перевозочного процесса на сетях ГРТС являются плановые графики движения (ПГД) транспортных средств, в частности пассажирских поездов метрополитена (ППМ). С ПГД тесно взаимосвязаны графики оборота электроподвижного состава (ГО ЭПС), а также графики работы локомотивных бригад [2, 3].

Во многих статьях обсуждалось решение проблемы комплексного планирования перевозочного процесса с составлением на базе различных методов взаимно увязанных ПГД, ГО ЭПС и графиком работы локомотивных бригад [4, 5]. В работе [6] обозначенная проблема определена и поставлена в классической формулировке фундаментальной задачи комбинаторной оптимизации — задачи о назначениях. В работе [7] автоматизацию планирования диагностических и ремонтных мероприятий, закладываемых в ГО ЭПС, предложено выполнять на базе строгой формализации, использующей методы и способы решения задач из теории графов с применением рекурсивного принципа динамического программирования (планирования) Беллмана. Предложенный подход позволяет обнаруживать все интересные наборы возможных назначений диагностических и ремонтных мероприятий, после чего остается только выбрать варианты, отвечающие плановым эксплуатационным показателям и минимально отличающиеся от оптимального значения с точки зрения выбранного критерия. На реализацию такого подхода уходит много времени, и проблема возникает на стадии выбора критерия поддержания равномерности при ограниченных ресурсах. Таким образом, важной задачей является снижение затрат времени на комплексное планирование перевозочного процесса ГРТС и совершенствование системы автоматизированного планирования перевозочного процесса ГРТС. В этом случае генетический алгоритм (ГА) является эффективным инструментом оптимизации [8]. Предлагаемый в статье математический аппарат основан на использовании комбинаторики, теории графов и ГА.

В статье исследована применимость ГА к решению задачи планирования перевозочного процесса на ГРТС на примере автоматизации составления ПГД ППМ. Основная цель исследования — усовершенствовать автоматизированную систему составления ПГД поездов для обеспечения равномерности процессов с использованием разнообразных ресурсов при учете существующих ограничений.

Труды, посвященные автоматизации составления ПГД ППМ и выступающие в качестве

основ решения задач планирования перевозочного процесса ГРТС, подразделяются на:

1. Обобщение опыта автоматизации составления ПГД ППМ:
 - формализация и разработка математических моделей ПГД ППМ [5, 9, 10];
 - рассмотрение фундаментальных политик и принципов реализации вычислительных процессов, связанных с составлением ПГД ППМ [11, 12];
 - обеспечение равномерности (выравнивание) интервалов движения ГРТС [13–15];
 - рассмотрение различных способов визуализации [13, 15–17];
 - составление ГО ЭПС [18–20];
 - планирование работы ЛБ [2, 21];
 - энергооптимальное планирование движения [22–25];
2. Вопросы составления ПГД ППМ различных типов:
 - традиционный ПГД [13, 15, 26–28];
 - график зонного типа на метрополитене [9, 29] и на пригородном железнодорожном сообщении [30];
 - кольцевая линия [12, 31].

1. Этапы решения задач оптимизации с использованием ГА

При решении задач оптимизации с использованием ГА должны быть выполнены следующие основные шаги [32]:

1. Инициализация исходных данных для корректного функционирования ГА, включающая:
 - загрузку информации о хромосоме (особи) в виде, определяемом спецификой решаемой задачи;
 - загрузку информации, необходимой для вычисления значения критерия (фитнес-функции);
 - ввод параметров функционирования ГА:
 - способ кроссинговера;
 - размер исходной популяции;
 - предельное количество поколений, на протяжении которых значения критерия (фитнес-функции) не улучшаются;
 - точность вычисления значения критерия (фитнес-функции);
 - максимальное время функционирования ГА и др.

2. Генерация первичной популяции (первого, иницирующего поколения).

3. Вычисление значения критерия (фитнес-функции) для каждой отдельно взятой хромосомы (особи).

4. Формирование нового поколения (шаг ГА), моделирование процесса эволюции, при котором происходит:

- отбор хромосом (особей) с лучшими значениями критерия (фитнес-функции) внутри рассматриваемой популяции;
- получение новых хромосом (особей) в результате выполнения кроссинговера для пар особей, выбранных в качестве родителей внутри рассматриваемой популяции;
- получение новых хромосом (особей) в результате выполнения мутаций отдельных особей, выбранных внутри рассматриваемой популяции.

5. Проверка условия окончания работы алгоритма. При невыполнении условия окончания осуществляется переход к п. 3.

2. Определение генотипа ПГД

Для решения задач планирования перевозочного процесса с использованием ГА необходимо выполнить адаптацию понятий, связанных с этим алгоритмом, для решаемых задач [33].

Эволюция — генетический процесс трансформации множества исходных/рассматриваемых вариантов автоматизированного составления ПГД.

Популяция/поколение — множество вариантов автоматизированного составления ПГД, рассматриваемое на одной итерации эволюции.

Особь — экземпляр ПГД, описываемый совокупностью хромосом, представленной в табл. 1.

Хромосома — структура, описывающая один из переходных процессов (ПП) ПГД. Варианты составления хромосом представлены в табл. 2–4.

Генотип — набор хромосом особи, задающий способ составления соответствующего экземпляра ПГД, представленный в табл. 1.

Фитнес-функция — величина отклонения от планового времени завершения движения по главным путям линии метрополитена или штрафа, учитывающего количество реализованных этапов автоматизации составления ПГД и количество точек ночной расстановки, для которых назначение маршрута на ночную расстановку не удалось.

Мутация — генетический процесс, связанный с изменением представленного в табл. 1 генотипа ПГД ППМ. Мутация, как правило, происходит под влиянием факторов внешней или внутренней среды.

Кроссинговер — генетический процесс, связанный с изменением представленного в табл. 1 генотипа ПГД ППМ. Кроссинговер происходит в результате обмена генетическим материалом между хромосомами (особями) внутри рассматриваемой популяции.

Адаптация терминов «Ген», «Локус» и «Алель» представлена в табл. 2–4.

Таблица 1. Генотип ПГД

Тип хромосомы	Сокращенное наименование	Количество хромосом одного типа в генотипе
Ввод составов перед утренним часом пик	$a_{tr^{m+}}$	Количество полных оборотов составов, приходящихся на ПП ПГД, умноженное на два (рассматриваются 2 главных пути)
Выход из расстановки	a_m	1
Снятие составов в электродепо по завершении процесса утреннего часа пик	$a_{tr^{m-}}$	Количество итераций выполнения полного оборота составов, приходящееся на ПП ПГД. Умножается на два, поскольку рассматриваются два главных пути линии метрополитена
Ввод составов из электродепо до начала процесса вечернего часа пик	$a_{tr^{e+}}$	
Снятие составов в электродепо по завершении процесса вечернего часа пик	$a_{tr^{e-}}$	
Уход составов на ночную расстановку на линию и в электродепо	a_e	1
Назначение технического осмотра	$a_{непик}$	1

Таблица 2. Структура хромосом для ПП ПГД a_{trm+} , a_{trm-} , a_{tre+} и a_{tre-}

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Вариант ввода (или снятия) составов по I главному пути линии метрополитена	Количество равномерных вводов (или снятий) составов, производимых внутри рассматриваемого ПП по I главному пути линии метрополитена	Мощность множества вариантов реализации каждого равномерного ввода или (снятия) составов по I главному пути линии метрополитена, производимого внутри рассматриваемого ПП, $x_{i,j}$ [34, 35]: $x_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{\text{НОД}(M_{i,j}, M_{i+1,j})},$ где $M_{i,j}$ — количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу рассматриваемого интервала времени (процесса ПГД) с порядковым номером i ; $M_{i+1,j}$ — количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу следующего к рассматриваемому интервалу времени; НОД — наибольший общий делитель
Вариант ввода (или снятия) составов по II главному пути линии метрополитена	Количество равномерных вводов (или снятий) составов, производимых внутри рассматриваемого ПП по II главному пути	Мощность множества вариантов реализации каждого равномерного ввода (снятия) составов по II главному пути, вычисляемое аналогично тому, как это сделано для I главного пути
Маршрут, поставленный в заданную точку ночной расстановки	Количество вводимых (снимаемых) составов внутри рассматриваемого ПП	Мощность множества маршрутов, которые могут быть назначены на рассматриваемую «нитку»

Таблица 3. Структура хромосомы ПГД a_m и a_e

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Номер пути в дереве последовательности заполнения/освобождения точек ночной расстановки [20]	1	Число путей в дереве
Маршрут, поставленный к заданной точке ночной расстановки	Длина пути дерева	Мощность множества маршрутов, которые могут быть отправлены на «ночевку» в указанную точку ночной расстановки, расположенную на главном или станционном пути линии метрополитена

Таблица 4. Структура хромосомы ПГД $a_{перик}$

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Маршрут, отправленный в осмотр	Количество выполняемых осмотров по всем пунктам технического обслуживания	Мощность множества маршрутов, для которых необходимо провести осмотр в текущем диапазоне времени в указанном пункте технического обслуживания, расположенном на станционных путях линии метрополитена

При решении задачи составления ПГД генотип ПГД задается набором хромосом особи, каждая из которых состоит из гетерогенных генов, для каждого из которых существует собственный набор аллелей. Число локусов в каждой хромосоме равно числу мест, в которых происходит выбор способа составления ПГД (ПП ПГД) [12, 34]. Мощность множества аллелей N_a для каждого из локусов определяется количеством вариантов реализации ПГД

на данном этапе. Описание генотипа ПГД приведено в табл. 1, а табл. 2–4 содержат информацию о строении различных типов хромосом.

3. Выбор фитнес-функции

При составлении ПГД в качестве критериев качества в первую очередь рассматриваются критерии равномерности [12, 36, 37]:

- критерий равномерности интервалов движения по отправлению поездов со станций;

– критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов.

Сравнение вариантов ПГД проводится согласно дополнительно сформулированным показателям качества [38]:

- количество разменов маршрутов через электродепо;
- параметры регулировочных отстоев на станционных путях линии (количество, общая (суммарная), средняя, максимальная длительности и другие параметры регулировочных отстоев);
- времена завершения движения по каждому из главных путей линии;
- параметры графика зонного типа или ввода/снятия составов на промежуточных станциях;
- параметры времен оборота состава на конечных и промежуточных станциях.

Развитие модели автоматизации составления ПГД ППМ потребовало переосмысления и более полного рассмотрения «вектора-кода» варианта автоматизированного составления ПГД (далее — просто «вектор-код»).

Ранее в качестве «вектора-кода» рассматривалась строка текста (сформулировано в [17]). Предлагается рассмотреть «вектора-кода» в виде объекта, который можно формально записать нижеследующим образом:

$$VarVect = (ID, Seq, Criteria), \quad (1)$$

где ID — уникальный идентификатор исходного набора данных, необходимых для автоматизированного составления ПГД ППМ;

Seq — кортеж целых чисел, каждая позиция в котором определяет номер итерации смещения последовательности ввода/снятия состава относительно первично рассчитанной [34] согласно алгоритму целочисленного деления Евклида для поиска равномерных расположений [37] — эти числа одновременно являются аллелями, входящими в табл. 1;

$Criteria$ — значение фитнес-функции оценки качества варианта автоматизированного составления ПГД, измеряемое в «метросекундах» (на метрополитене расчеты показателей времени ведутся с дискретизацией в 5 се-

кунд, потому метросекунда — это 5 астрономических секунд, 12 метросекунд содержатся в астрономической минуте, 720 метросекунд составляют астрономический час).

Информация о получении первого поколения хранится в файле, ином внешнем источнике информации или генерируется в автоматизированной системе составления ПГД поездов.

Информация о популяции любого поколения может быть представлена в виде двумерных массивов, в которых количество строк равно N — размер популяции, количество столбцов равно Nl или $Nl + 1$ в зависимости от формы представления исходных данных. Элемент матрицы при размерности $[N \times Nl]$:

$$Z_{i,j} \in [1...Na_i], \quad i \in 1...N, \quad j \in 1...Nl, \quad (2)$$

где Na — количество вариантов смещения последовательности ввода/снятия составов относительно первично рассчитанной последовательности согласно алгоритму целочисленного деления Евклида для поиска равномерных расположений — мощность множества аллелей;

Nl — количество итераций равномерных вводов/снятий составов [34] (итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо), реализуемых в ходе расчета варианта автоматизированного составления ПГД — мощность множества локусов.

Полученные ранее результаты показали, что, несмотря на потенциально большое количество вариантов выбора управляющих воздействий при составлении ПГД для заданных исходных данных, количество вариантов управляющих воздействий, приводящих к успешному составлению ПГД, невелико, поэтому еще одним критерием приближения к успешному составлению ПГД может служить количество точек ночной расстановки, для которых назначение маршрута на ночную расстановку не удалось при выбранных вариантах управления. При успешном составлении ПГД таких точек не должно остаться.

При размерности $[N \times Nl + 1]$ в матрицу добавляется столбец, содержащий числовое значение выбранного критерия (фитнес-функции) для каждой строки матрицы:

$$Criteria_i = \begin{cases} t_{\text{пр}}^{\text{max}}, & \text{если } X_1 = 0 \text{ и } X_2 = 0 \\ C_0 - C_1 X_1 - C_2 X_2, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где $t_{\text{пр}}^{\text{max}}$ — время завершения движения в соответствии с успешно реализованным вариантом автоматизированного составления ПГД (в [39] учитывается оценка для случая движения по двум условно независимым главным путям линии метрополитена);

$$t_{\text{пр}}^{\text{max}} = \max_{i=1..M} \mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e : \mathbf{n}_{end} : t_{ste}, \quad (4)$$

где \mathbf{m}_i — i -й маршрут, приписанный к электродепо, на рассматриваемой линии метрополитена;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e$ — точка ночной расстановки, в которую уходит маршрут \mathbf{m}_i ;

\mathbf{n}_{end} — «нитка», движение по которой заканчивается в точке ночной расстановки;

t_{ste} — время окончания движения до светфора «Е» или точки ночной расстановки;

M — количество маршрутов на линии;

C_0 — максимальная величина штрафа за отсутствие завершенности рассматриваемого варианта автоматизированного составления ПГД с точки зрения соблюдения условий успешной реализации [40] (в рассматриваемом случае, $C_0 = 32\,700$ [метросекунд]);

C_1 — коэффициент, определяющий зависимость значения фитнес-функции от количества выполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо (в рассматриваемом случае $C_1 = 100$ [метросекунд]);

X_1 — количество выполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо;

C_2 — коэффициент, определяющий зависимость значения фитнес-функции от количества «ниток», оставшихся без связи после неудачной попытки реализации ночной расстановки (в рассматриваемом случае $K_2 = 1$ [метросекунда]);

X_2 — количество «ниток», оставшихся без связи после неудачной попытки реализации ночной расстановки [17];

$$X_2 = \sum_{i=1}^T \begin{cases} 1, & \mathbf{n}_i : fS = 0 \vee \mathbf{n}_i : fE = 0 \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где T — общее количество «ниток» на ПГД;

\mathbf{n}_i — i -я «нитка» на ПГД;

$\mathbf{n}_i : fS$ — признак наличия связи «нитки» в начале движения по главному пути (0 соответствует отсутствию какой-либо связи);

$\mathbf{n}_i : fE$ — признак наличия связи «нитки» в конце движения по одному из главных путей линии метрополитена, согласующемуся с направлением движения по «нитке» (0 соответствует отсутствию какой-либо связи).

При таких значениях коэффициентов два младших разряда несут информацию о заполнении точек ночной расстановки, если все итерации распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо, выполнены, 3-й и 4-й разряды несут информацию о количестве невыполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо.

Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы в случае успешного завершения составления ПГД значение критерия было заведомо меньше, чем в случае неудачного составления ПГД.

Возможен и дополнительный контроль корректности организации выхода составов из ночной расстановки при необходимости:

$$\sum_{i=1}^T \mathbf{n}_i |_{(\mathbf{n}_i : fS = 0 \wedge \mathbf{n}_i : \mathbf{n}_{pn} = \emptyset)} = 0, \quad (6)$$

где $\mathbf{n}_i : \mathbf{n}_{pn}$ — точка ночной расстановки, связанная с i -й «ниткой».

Более тонкая настройка значений фитнес-функции ГА может быть выполнена путем учета требований, предъявляемых к рациональности проведения ремонтов и осмотров в электродепо и линейных пунктах технического обслуживания.

Обеспечение малых значений критериев равномерности ПГД достигается реализуемыми алгоритмами составления ПГД. В качестве фитнес-функции используются времена окончания движения по I и II главным путям, так как

именно они позволяют осуществить сравнение качества успешно составленных вариантов ПГД. На эти показатели необходимо обращать первоочередное внимание, так как движение по линии метрополитена не должно быть затянато. Это необходимо для предоставления как можно большего времени на проведение ночных работ.

В качестве критерия рационального планирования ГО ЭПС введен критерий равномерности размещения обслуживаний, определяемый одним из двух способов [33]:

- сумма квадратов отклонений времен начала обслуживания для кандидата, используемого для проведения обслуживания, от желаемых времен начала проведения обслуживания;
- сумма квадратов интервалов времени между обслуживаниями.

В случае ограниченных ресурсов в качестве критерия, позволяющего получить решение для любых исходных данных, используется значение суммарного превышения времени между обслуживаниями над допустимым.

При составлении графика работы локомотивных бригад критерий качества определяется балансом между навыками персонала и его численностью, количеством рабочих смен и выполнением требований нормативных документов. В рассматриваемом случае таким критерием служит среднеквадратичное отклонение продолжительности рабочего времени различных локомотивных бригад в течение одного промежутка времени [2].

4. Определение размера первичной популяции

Настройка исходных значений параметров функционирования ГА напрямую связана с вводом размера первичной популяции. То, в каком объеме поступает на вход первичная популяция, определяет для каждого последующего процесса эволюции, какое количество особей должно в обязательном порядке быть рассмотрено в каждом новом поколении. Если задаться чрезмерно большим значением размера первичной популяции, то ГА будет осуществлять более тщательный и более длительный поиск в пространстве решений. При этом

вероятность того, что будет найден локальный, а не глобальный минимум, уменьшится.

Величина размера первичной популяции варьируется в диапазоне от единицы до максимального числа вариантов составления ПГД ППМ, равного произведению числа вариантов реализации всех этапов составления ПГД [34].

При выборе размера первичной популяции, равного максимальному числу вариантов составления ПГД ППМ (это число порядка 10^9), ГА вырождается в алгоритм полного перебора вариантов. При выборе размера первичной популяции, равного единице, также наступает вырожденный случай, при котором происходит случайный выбор любого значения. Это значение волонтаристским образом назначается оптимальным, что ошибочно.

Предположим, что размер первичной популяции равен N . Мощность множества аллелей i -го гена равна Na_i . Обозначим Q_N^k — количество вариантов заполнения N ячеек при помощи ровно k выбранных значений.

Тогда количество вариантов заполнения N ячеек при помощи Na_i возможных значений при условии, что некоторые из них могут и не использоваться, определяется по формуле:

$$N = \sum_{k=1}^{Na_i} Q_N^k. \quad (7)$$

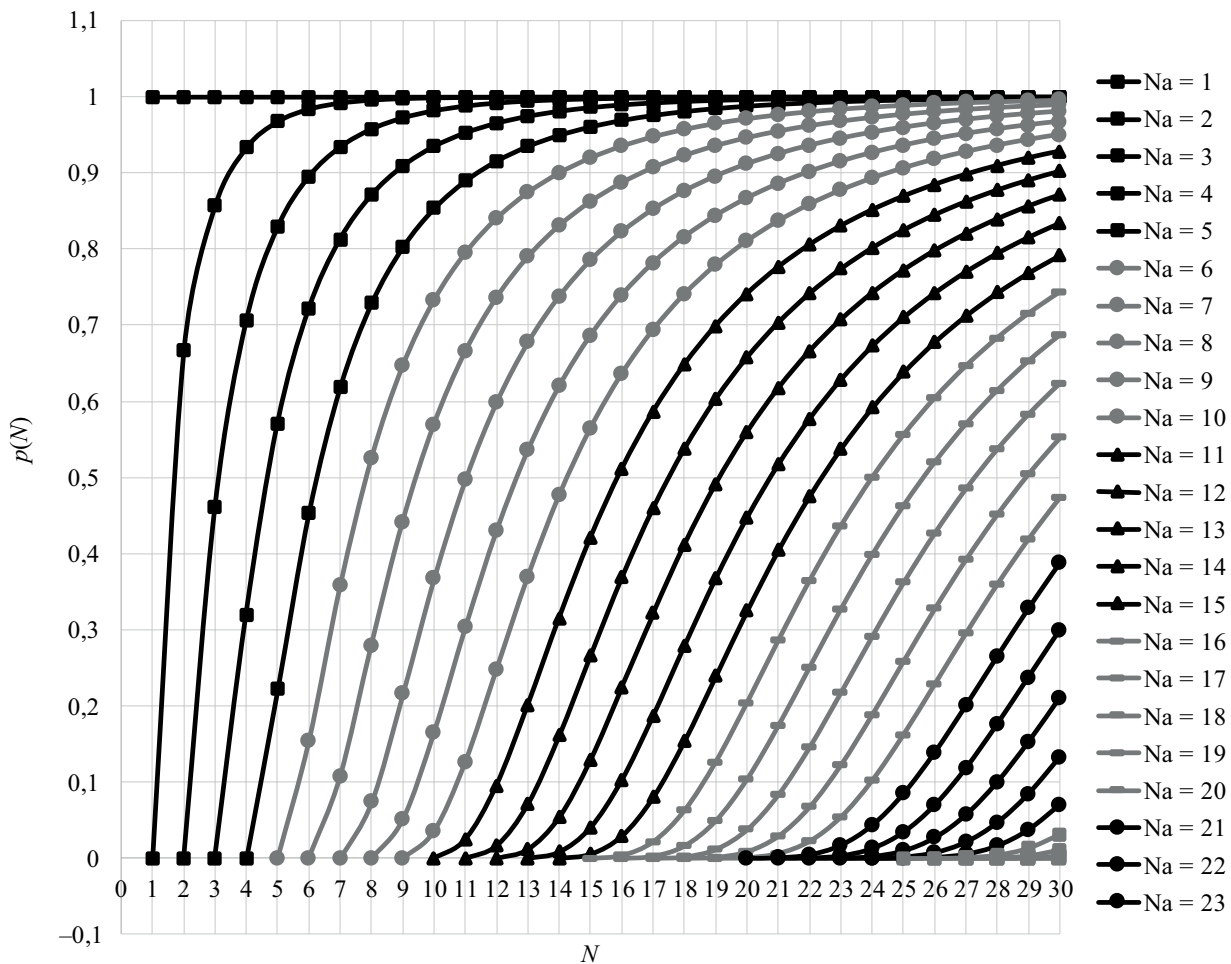
Вероятность того, что при заполнении N ячеек будут использованы все Na_i возможных значений, определяется по формуле:

$$p_i = \frac{\text{Количество благоприятных событий}}{\text{Количество всех событий}} = \frac{Q_N^{Na_i}}{\sum_{k=1}^{Na_i} Q_N^k}. \quad (8)$$

При выборе размера популяции должна быть решена задача обеспечения значения p_i не ниже заданного уровня. Выполним последовательно расчет для мощностей множества аллелей, равных одному, двум, трем и четырем:

$$Q_N^1 = C_{Na_i}^1 = N, \quad (9)$$

$$Q_N^2 = C_{Na_i}^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} C_N^i, \quad (10)$$



Семейство «сигмоид», демонстрирующих изменение вероятности $p_i(N, Na)$

$$Q_N^3 = C_{Na_i}^3 \cdot \sum_{i=1}^{N-2} \left[C_N^i \cdot \sum_{j=1}^{N-i-1} C_{N-i}^j \right], \quad (11)$$

$$p = \prod_{i=1}^N p_i. \quad (14)$$

$$Q_N^4 = C_{Na_i}^4 \cdot \sum_{i=1}^{N-3} \left[C_N^i \left[\sum_{j=1}^{N-i-1} \left[C_{N-i}^j \sum_{l=1}^{N-j-1} C_{N-j}^l \right] \right] \right]. \quad (12)$$

Общий случай для мощности множества аллелей, равного k , рассмотрен далее:

$$Q_N^k = C_{Na_i}^k \cdot \sum_{i_0=1}^{N-k+1} \left[C_N^{i_0} \left[\sum_{i_1=1}^{N-i_0-1} \left[C_{N-i_0}^{i_1} \sum_{i_2=1}^{N-i_1-1} C_{N-i_1}^{i_2} \right] \right] \right]. \quad (13)$$

Вложенные суммы вычисляются до тех пор, пока верхний предел суммирования остается больше единицы: $N - i_j - 1 > 1, i_j < N - 2$.

Вероятность события, при котором все N локусов включают в себя полный набор аллелей (он при переходе между локусами в рассматриваемой задаче изменяется), равна:

К расчету значений вероятности присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей $p_i(N, Na)$ при различных значениях количества аллелей Na в зависимости от размера популяции N применен высокоуровневый язык программирования *Python*. На сегодня этот язык популярен [27] преимущественно из-за многочисленных подключаемых библиотек, а также из-за удобства настройки нейронных сетей и машинного обучения [1]. Применительно к решаемой задаче поиска вероятностей при известных соотношениях из комбинаторики *Python* имеет возможность обработки сверхбольших целых чисел, столь необходимых для расчета факториалов [41]. *Python* по праву назван языком для анализа данных [42], он показал

свою эффективность в экспериментальной математике [43] и при оценке сложности составляемых алгоритмов [44].

По рисунку удобно оценивать влияние размера популяции и мощности множества аллелей на вероятность получения благоприятного исхода — присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей.

Представлено семейство «сигмоид», скорость изменения значений $p_i(N, Na)$ в котором уменьшается с ростом общего количества рассматриваемых событий. Характеристики идентичны друг другу и могут использоваться для прогнозирования значений $p_i(N, Na)$ при других сочетаниях значений N и Na .

Набор исходных данных для моделируемой ситуации автоматизированного составления ПГД N фиксирован и составляет:

- 6 значений до утреннего часа пик;
- 4 значения после утреннего часа пик;
- 4 значения до вечернего часа пик;
- 8 значений после вечернего часа пик.

Всего 22 элемента «вектора-кода» варианта автоматизированного составления ПГД предоставляют возможность его однозначного восстановления согласно разработанным алгоритмам. В автоматизированную систему составления ПГД через «задатчик» [17] может быть введена последовательность, приведенная в примере, с целью просмотра и (или) редактирования:

$$\begin{array}{cccc}
 \underbrace{3; 2; 1; 1; 1; 1; 1}_{2 \cdot 3=6} & \underbrace{1; 7; 2; 1}_{2 \cdot 2=4} & \underbrace{9; 3; 1; 6}_{2 \cdot 2=4} & \underbrace{2; 5; 7; 1; 1; 1; 5; 1}_{2 \cdot 4=8} \\
 \text{до утр. часа пик} & \text{после утр. часа пик} & \text{до веч. часа пик} & \text{после веч. часа пик}
 \end{array}$$

$N = 22$ ячейки

На каждой позиции записана реализация из диапазона $[1...Na_i]$. Na_i варьируется в зависимости от количества «ниток», оставшихся на ПГД к рассматриваемому моменту времени автоматизированного составления ПГД.

Заключение

Основная цель проведенного научного исследования достигнута — автоматизированная система составления ПГД ППМ усовершенствована для обеспечения равномерности процессов при использовании разнообразных

ресурсов и при учете существующих ограничений. Вместе с тем в статье показана применимость ГА, учитывающего равномерность процессов, к комплексу задач автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене. Доказана эффективность применения ГА, в частности для решения задачи автоматизации составления ПГД ППМ, — транспортного объекта, являющегося одним из рассматриваемых звеньев ГРТС.

Статья содержит результаты адаптации ГА к решению задачи автоматизации составления ПГД при планировании перевозочного процесса в рамках ГРТС. Выполнен расчет значений вероятности присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей в зависимости от размера популяции. Изложенные положения пригодны для решения задач планирования перевозочного процесса, в частности планирования движения поездов в условиях ограничения ресурсов при учете требований, предъявляемых к результатам планирования функционирования ГРТС, что подтверждает свойства открытости и модульности автоматизированной системы составления плановых графиков движения ППМ.

К недостаткам примененного подхода относятся:

- сложность адаптации параметров управления технологическими процессами предметных областей под условия функционирования ГА (сфера планирования перевозочного процесса на ГРТС — не исключение);

- использование обобщений и допущений при формализации описания критерия для оценки качества составления ПГД с использованием разработанного и внедренного в автоматизированную систему построения ПГД ППМ алгоритма автоматизации;

- затяжной расчет вероятностей получения благоприятного исхода — присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей при совместно больших значениях размера первичной популяции и потребного количества аллелей.

При всей сложности адаптации ГА к условиям планирования перевозочного процесса

на ГРТС эта работа выполнена, и ее ключевые положения изложены в настоящей статье. Введение более детального и жестко ограниченного критерия должно способствовать сокращению количества успешно реализованных вариантов составления ПГД, что, в свою очередь, способствует снижению трудозатрат оператора при поиске эффективного варианта составления ПГД и принятия решения относительно его выбора в качестве действующего ПГД, с которым может полноценно работать линия метрополитена. Длительность расчета вероятностей получения благоприятного исхода (присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей при совместно больших значениях размера первичной популяции и потребного количества аллелей) легко парируется возможностью прогнозирования «сигмоид», содержащих близкие к истинным значения вероятностей, для сколь угодно больших значений размера первичной популяции и потребного количества аллелей при использовании в качестве априорных сведений «сигмоид», представленных на рис. 1 в настоящей статье.

Созданное программное обеспечение для определения рационального размера первичной популяции ГА является составной частью автоматизированной системы составления ПГД пассажирских поездов по линиям Московского метрополитена, что является примером реализации микросервисной архитектуры [45] централизованной интеллектуальной системы управления ГРТС.

В числе нерешенных проблем в рамках рассматриваемой задачи остается поиск рациональной схемы для унифицированной генерации «векторов-кодов» в составе первичной популяции заданного размера для различных начальных условий. В настоящее время эта задача решена только для нулевых начальных условий. Известно, что ряд вариантов при такой схеме генерации первичной популяции недостижим. Проверить и численно оценить долю недостижимых ГА вариантов составления ПГД внутри множества всех вариантов, просматриваемых при полном переборе, возможно только по завершении полного перебора вариантов составления ПГД. К настоящему

моменту полный перебор всех возможных вариантов автоматизированного составления ПГД не реализован.

В дальнейшем по тематике исследования планируется уточнение критерия для оценки качества составления ПГД:

- с использованием множества оцениваемых параметров, сформулированных для оценки качества работы внедренного алгоритма автоматизации составления ПГД [39];
- с использованием множества оцениваемых параметров, сформулированных на основе действующих эксплуатационных показателей работы линии метрополитена [17] и изложенных в сборнике Правил технической эксплуатации метрополитенов Российской Федерации.

По итогам проверки адекватности уточненного критерия планируется запуск ГА для быстрого поиска эффективных вариантов составления ПГД в областях, в обозримое время недостижимых имеющимся алгоритмом полного перебора вариантов составления ПГД. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, и др. // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. — М.: Российский университет транспорта, 2021. — С. 56–64.
2. Маркевич А. В. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин // XXVII международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — М.: РГУ, 2019. — С. 265–270.
3. Markevich A. V. Automation of scheduling for drivers of the subway rolling stock / A. V. Markevich, V. G. Sidorenko // Proceedings of the 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2021. — Batumi, 2021. — Pp. 1–10.
4. Zhao J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. Chan, M. P. Burrow // Rail Rapid Transit. — 2009. — Iss. 223. — Pp. 533–541.
5. Ho T. K. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization / T. K. Ho, C. W. Tsang, K. H. Ip et al. // Expert System Applications. — 2012. — Vol. 39. — Pp. 861–868.
6. Жербина А. И. Расчет на ЭВМ графика оборота составов метрополитена / А. И. Жербина // Межвузовский сборник. — 1980. — № 612. — С. 105–109.

7. Сидоренко В. Г. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов / В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Информатизация образования и науки. — 2015. — Т. 4. — № 28. — С. 123–132.
8. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. — London: MIT Press, 1999. — 162 p.
9. Феофилов А. Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1991. — № 7. — С. 10–13.
10. Быков В. П. Теоретические и методологические основы построения систем поддержки принятия решений при управлении движением поездов на участках железных дорог / В. П. Быков. — Хабаровск: ДВГУПС, 1999. — 135 с.
11. Петров А. С. Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов / А. С. Петров, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. — 2020. — Т. 1. — № 45. — С. 21–38.
12. Сафронов А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир транспорта. — 2010. — Т. 9. — № 3(36). — С. 98–105.
13. Дегтярев Д. П. Проблемы визуального анализа графика движения поездов на метрополитене и методы их решения / Д. П. Дегтярев, М. Н. Василенко, О. А. Максименко // Неделя науки — 2002: труды научно-практической конференции. — СПб.: ПГУПС, 2002.
14. Сеславин А. И. Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами / А. И. Сеславин, Л. Н. Воробьева // Наука и техника транспорта. — 2005. — № 2. — С. 71–73.
15. Сидоренко В. Г. Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, Е. Ю. Рындина // Вестник МИИТа. — 2008. — № 18. — С. 8–10.
16. Сафронов А. И. Оптимизация процедур визуализации графиков движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // Trans-Mech-Art-Chem: труды VII Международной научно-практической конференции. — М.: МИИТ, 2010. — С. 315–317.
17. Сафронов А. И. Анализ результатов автоматизированного построения плановых графиков движения поездов по кольцевой линии Московского метрополитена / А. И. Сафронов, А. В. Дудкин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 290–297.
18. Баранов Л. А. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. — 1981. — № 2. — С. 17–20.
19. Сидоренко В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена / В. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир Транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 4. — С. 154–165.
20. Чжо М. А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 19–25.
21. Пазойский Ю. О. Автоматизация расчета графика работы поездных бригад в пригородном сообщении / Ю. О. Пазойский, С. А. Бывшев; под общ. ред. Ф. П. Кочнева // Межвузовский сборник научных трудов «Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог». — 1981. — № 657. — С. 84–90.
22. Баранов Л. А. Внедрение энергосберегающих технологий / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов и др. // Мир транспорта. — 2010. — Т. 31. — № 3. — С. 3–8.
23. Моисеев А. А. Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги / А. А. Моисеев // Межвузовский сборник научных трудов. — 1989. — № 811. — С. 15–19.
24. Сидоренко В. Г. Влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Электроснабжение и электрооборудование. — 2014. — Т. 1. — С. 10–13.
25. Чинь Л. М. Влияние модели поезда на выбор энергооптимальных режимов управления современных поездов метрополитена / Л. М. Чинь, Л. А. Баранов, И. С. Мелешин // Вестник МИИТ. — 2010. — № 23. — С. 27–32.
26. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции «Транспорт XXI век». — Варшава, 2001.
27. Логинова Л. Н. Разработка аналитического алгоритма составления расписания движения поездов метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2022. — С. 221–225.
28. Логинова Л. Н. Математические методы и основные принципы организации транспортных перевозок / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Транспортное дело России. — 2021. — № 4. — С. 84–87.
29. Сидоренко В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. — 2010. — № 4. — С. 128–134.
30. Роменский Д. Ю. Постановка задачи выбора мест расположения и емкости путей отстоя составов пригородных и пригородно-городских электропоездов / Д. Ю. Роменский // Наука и техника транспорта. — 2020. — Т. 1. — С. 60–65.
31. Сафронов А. И. Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час пик на замкнутой Большой Кольцевой линии Московского метрополитена / А. И. Сафронов, Е. В. Лысенко // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 4. — С. 584–616.
32. Чжо М. А. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, В. М. Алексеев и др. // Электротехника. — 2017. — № 12. — С. 73–76.
33. Чжо М. А. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 6. — С. 37–40.
34. Сафронов А. И. Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов

- метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Вестник РГУПС. — 2012. — № 3(47). — С. 99–104.
35. Сидоренко В. Г. Анализ быстродействия алгоритмов автоматизированного построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ'12). — М.: Учреждение Российской академии наук «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН», 2012. — С. 76.
 36. Сеславин А. И. Принципы равномерности в задачах управления потоками пассажирского транспорта / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина // Прикладная информатика. — 2009. — № 2(20). — С. 91–95.
 37. Концевич М. Л. Равномерные расположения / М. Л. Концевич // Квант. — 1985. — № 7. — С. 51–52, 59.
 38. Сафронов А. И. Уровни успешной реализации автоматизированного построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена и критерии отбора эффективных результатов / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем. — М.: РГУ, 2011. — С. 307–311.
 39. Сафронов А. И. Множество оцениваемых параметров результата автоматизированного построения плановых графиков движения поездов и графоаналитические способы их сопоставления / А. И. Сафронов, А. С. Иконников // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: РУТ (МИИТ). — 2022. — С. 306–315.
 40. Сидоренко В. Г. Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 1. — С. 51–56.
 41. Баландин Д. В. Программный модуль для построения оптимального графика переработки сырья / Д. В. Баландин, О. А. Кузенков, В. К. Вильданов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2021. — Т. 17. — № 2. — С. 442–452.
 42. Ермаков О. А. Python — как инструмент для анализа данных / О. А. Ермаков, Н. П. Брозгунова // Наука и Образование. — 2020. — Т. 3. — № 4. — С. 26.
 43. Рожков А. В. Экспериментальная математика в КУБГУ — первые результаты / А. В. Рожков // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 1–5 марта 2021 года. — Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2021. — С. 163–172.
 44. Буянова И. В. Применение приближения с помощью кривых для определения вычислительной сложности решений задач по программированию / И. В. Буянова, И. С. Замулин // Современные наукоемкие технологии. — 2022. — № 5-2. — С. 232–236.
 45. Новиков В. Г. Микропроцессорные системы управления движением поездов в Московском метрополитене / В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, В. А. Кузюков // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 268–293.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 49–62
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62

Application of Genetic Algorithms at Solution of Tasks for Transportation Process Planning of City Rail Transport System

Information about authors

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

Safronov A. I., PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor.
E-mail: safronov-ai@mail.ru

Russia University of Transport (MIIT), Department “Management and Protection of Information”, Moscow

Abstract: The article investigates the possibility to apply genetic algorithms at automation of planned schedules compilation for subway passenger train traffic. Research main goal – to improve automated system of planned schedule compilation for passenger trains for to provide for processes evenness at the use of various resources and consideration of existing limitations. Necessary definitions of resources and limitations on conditions of genetic algorithm usage are narrowed down to interconnected and unified tables. On probability approach basis, the influence of various combinations of genetic algorithm parameter values on population compositions in the process of search for effective results of transportation process planning for urban rail transport system has been studied. For investigation needs, computer software has been performed on high-level languages *C#* и *Python*. Genetic algorithm adaptation to the solution of the task for compilation automation of planned schedule of subway passenger train traffic has been made and there has been shown the algorithm applicability to automa-

tion of the complex of interconnected tasks for the transportation process planning: electric rolling stock turnout schedule compilation and locomotive team work schedule. There have been calculated probability values to get favorable outcome – the presence of all possible allele values at various combinations of the values of primary population size and allele needed quantity in the results of train traffic planned schedules.

Keywords: genetic algorithm; fitness-function; evenness criteria; primary population size; *python*; urban rail transport system; train traffic schedule; transportation process planning.

References

1. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. *Kompleksnoe reshenie zadach planirovaniya i upravleniya dvizheniem gorodskikh rel'sovykh transportnykh sredstv. Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy 125-letiyu universiteta, Moskva, 22 oktyabrya 2021 goda* [Complex solution of problems of planning and traffic control of urban rail vehicles. Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2021, pp. 56–64. (In Russian)
2. Markevich A. V., Sidorenko V. G., Kulagin M. A. Vliyaniye chelovecheskogo faktora na bezopasnost' dvizheniya poezdov [Influence of the human factor on the safety of train traffic]. *XXVII mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem"* [XXVII international scientific conference “Problems of managing the safety of complex systems”]. M.: RGGU Publ., 2019, pp. 265–270. (In Russian)
3. Markevich A. V., Sidorenko V. G. Automation of scheduling for drivers of the subway rolling stock. Proceedings of the 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2021. Batumi, 2021, pp. 1–10.

4. Zhao J., Chan A. H., Burrow M. P. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components. *Rail Rapid Transit*. 2009, Iss. 223, pp. 533–541.
5. Ho T. K., Tsang C. W., Ip K. H. et al. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization. *Expert System Applications*, 2012, vol. 39, pp. 861–868.
6. Zherbina A. I. Raschet na EVM grafika oborota sostavov metropolitena [Calculation on the computer of the schedule of turnover of subway trains]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. 1980, Iss. 612, pp. 105–109. (In Russian)
7. Sidorenko V. G., Filipchenko K. M. Metod effektivnogo planirovaniya obsluzhivaniya s primeneniem teorii grafov [Efficient service planning method using graph theory]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2015, vol. 4, Iss. 28, pp. 123–132. (In Russian)
8. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. London: MIT Press Publ., 1999. 162 p.
9. Feofilov A. N. Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poezdov na liniyakh metropolitena [Mathematical model for scheduling trains on metro lines]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1991, Iss. 7, pp. 10–13. (In Russian)
10. Bykov V. P. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy postroeniya sistem podderzki prinyatiya resheniy pri upravlenii dvizheniem poezdov na uchastkakh zheleznykh dorog* [Theoretical and methodological foundations for constructing decision support systems in the management of train traffic on sections of railways]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 1999, 135 p. (In Russian)
11. Petrov A. S., Sidorenko V. G. Arkhitektura mnogopotochnogo programmnoyu produkta, realizuyushchego planirovanie logisticheskikh protsessov [The architecture of a multi-threaded software product that implements the planning of logistics processes]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2020, vol. 1, Iss. 45, pp. 21–38. (In Russian)
12. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Postroenie planovogo grafika dvizheniya dlya metropolitena [Construction of a planned traffic schedule for the subway]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, vol. 9, Iss. 3(36), pp. 98–105. (In Russian)
13. Degtyarev D. P., Vasilenko M. N., Maksimenko O. A. *Problemy vizual'nogo analiza grafika dvizheniya poezdov na metropolitene i metody ikh resheniya. Nedelya nauki 2002: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of visual analysis of the subway train schedule and methods of their solution. Week of Science — 2002: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2002. (In Russian)
14. Soslavin A. I., Vorob'eva L. N. Gradientnyy sposob tsentralizovannogo upravleniya gorodskimi transportnymi sistemami [Gradient method of centralized management of urban transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2005, Iss. 2, pp. 71–73. (In Russian)
15. Sidorenko V. G., Ryndina E. Yu. Metody vyравnivaniya intervalov dvizheniya poezdov metropolitena [Methods for leveling the intervals of movement of metro trains]. *Vestnik MIITa* [Vestnik MIIT]. 2008, Iss. 18, pp. 8–10. (In Russian)
16. Safronov A. I. *Optimizatsiya protsedur vizualizatsii grafikov dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena. TRANS-MECH-ART-CHEM: trudy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Optimization of procedures for visualization of metro passenger train schedules. Trans-Mech-Art-Chem: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. M.: MIIT Publ., 2010, pp. 315–317. (In Russian)
17. Safronov A. I., Dudkin A. V. *Analiz rezul'tatov avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya poezdov po kol'tsevoy linii Moskovskogo metropolitena. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Analysis of the results of automated construction of planned schedules for the movement of trains along the Moscow metro ring line. Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 290–297. (In Russian)
18. Baranov L. A., Zherbina A. I. Postroenie na EVM grafikov dvizheniya poezdov metropolitena [Construction of metro train schedules on a computer]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1981, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
19. Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M. Avtomatizatsiya planirovaniya raboty EPS metropolitena [Automation of scheduling the operation of the EPS of the metro]. *Mir Transporta* [World of Transport]. 2015, vol. 13, Iss. 4, pp. 154–165. (In Russian)
20. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Filipchenko K. M. Vliyaniye nochnoy rasstanovki sostavov na rezhim raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena [Influence of the night arrangement of trains on the operating mode of the electric rolling stock of the subway]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2016, Iss. 9, pp. 19–25. (In Russian)
21. Pazoyskiy Yu. O., Byvshev S. A. Avtomatizatsiya rascheta grafika raboty poezdnykh brigad v prigorodnom soobshchenii; pod obshch. red. F. P. Kochneva [Automation of the calculation of the work schedule of train crews in suburban traffic; ed. F. P. Kochneva]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Optimizatsiya ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog"* [Interuniversity collection of scientific papers "Optimization of the operational work of railways"]. 1981, Iss. 657, pp. 84–90. (In Russian)
22. Baranov L. A., Gaev D. V., Ershov A. V. et al. Vnedreniye energosberegayushchikh tekhnologiy [Implementation of energy-saving technologies]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, vol. 31, Iss. 3, pp. 3–8. (In Russian)
23. Moiseev A. A. Energeticheski optimal'noye upravleniye dvizheniem podvizhnogo sostava s diskretnym regulirovaniem sily tyagi [Energy-optimal control of the movement of rolling stock with discrete control of traction]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Interuniversity collection of scientific papers]. 1989, Iss. 811, pp. 15–19. (In Russian)
24. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Vliyaniye planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena na rezhim raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Influence of the planned schedule of movement of metro passenger trains on the mode of operation of the system]. *Elektrosnabzheniye i elektrooborudovaniye* [Power supply and electrical equipment] 2014, vol. 1, pp. 10–13. (In Russian)
25. Chin' L. M., Baranov L. A., Meleshin I. S. Vliyaniye modeli poezda na vybor energooptimal'nykh rezhimov upravleniya sovremennykh poezdov metropolitena [Influence of a train model on the choice of energy-optimal control modes for modern metro trains]. *Vestnik MIIT* [Vestnik MIIT]. 2010, Iss. 23, pp. 27–32. (In Russian)
26. Vasilenko M. N., Degtyarev D. P., Maksimenko O. A. Avtomaticheskoye postroenie grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene [Automatic scheduling of trains on the subway]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "Transport XXI vek"* [Proceedings of the international conference "Transport XXI century"]. Varshava, 2001. (In Russian)
27. Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Razrabotka analiticheskogo algoritma sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov metropolitena. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Development of an analytical algorithm for scheduling the movement of metro trains. Intelligent transport systems: materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 221–225. (In Russian)
28. Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. Matematicheskie metody i osnovnye printsipy organizatsii transportnykh perevozok [Mathematical methods and basic principles of organization of transportation]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 4, pp. 84–87. (In Russian)
29. Sidorenko V. G., Novikova M. V. Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa [Synthesis of a zone-type planned traffic schedule]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, Iss. 4, pp. 128–134. (In Russian)
30. Romenskiy D. Yu. Postanovka zadachi vybora mest raspolozheniya i emkosti putey otstoya sostavov prigorodnykh i prigorodno-gorodskikh elektropoezdov [Statement of the problem of choosing the location and capacity of the sludge tracks of suburban

- and suburban-urban electric trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, vol. 1, pp. 60–65. (In Russian)
31. Safronov A. I., Lysenko E. V. Modelirovanie plana perevoznogo protsessa v utrenniy chas pik na zamknoy Bol'shoy Kol'tsevoy linii Moskovskogo metropolitena [Modeling the plan of the transportation process in the morning rush hour on the closed Bolshaya Koltsevaya line of the Moscow metro]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport]. 2021, vol. 7, Iss. 4, pp. 584–616. (In Russian)
 32. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Alekseev V. M. et al. Planirovanie obsluzhivaniya elektropodvizhnogo sostava v usloviyakh ogranichennykh resursov [Planning maintenance of electric rolling stock in conditions of limited resources]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2017, Iss. 12, pp. 73–76. (In Russian)
 33. Chzho M. A., Sidorenko V. G. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach planirovaniya raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena [Study of the possibility of using genetic algorithms to solve the problems of planning the work of the electric rolling stock of the subway]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2017, Iss. 6, pp. 37–40. (In Russian)
 34. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Avtomatizirovannoe postroenie planovogo grafika dvizheniya passazhirkh poezdov metropolitena [Automated construction of a planned schedule for the movement of metro passenger trains]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of PGUPS]. 2012, Iss. 3(47), pp. 99–104. (In Russian)
 35. Sidorenko V. G. Analiz bystrodeystviya algoritmov avtomatizirovannogo postroeniya planovogo grafika dvizheniya passazhirkh poezdov metropolitena [Analysis of the speed of algorithms for automated construction of a planned schedule for the movement of metro passenger trains]. *Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya (UKI'12)* [Technical and software tools for control, monitoring and measurement systems (UKI'12)]. Moscow: Uchrezhdenie Rossiyskoy akademii nauk "Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN" Publ., 2012, p. 76. (In Russian)
 36. Seslavin A. I., Seslavina E. A. Printsipy ravnomernosti v zadachakh upravleniya potokami passazhirkh transporta [Principles of uniformity in the problems of passenger transport flow control]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics]. 2009, Iss. 2(20), pp. 91–95. (In Russian)
 37. Kontsevich M. L. Ravnomernye raspolozheniya [Uniform arrangements]. *Kvant* [Kvant]. 1985, 7, pp. 51–52, 59. (In Russian)
 38. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Urovni uspekhnoy realizatsii avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya passazhirkh poezdov metropolitena i kriterii otbora effektivnykh rezul'tatov [Successful implementation levels of automated construction of planned schedules for the movement of metro passenger trains and criteria for selecting effective results]. *Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem* [Problems of managing the safety of complex systems]. Moscow: RGGU Publ., 2011, pp. 307–311. (In Russian)
 39. Safronov A. I., Ikonnikov A. S. Mnozhestvo otsenivaemykh parametrov rezul'tata avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya poezdov i grafoanaliticheskie sposoby ikh sopostavleniya [A set of estimated parameters of the result of automated construction of scheduled train schedules and graphic-analytical methods for their comparison]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, 26 May, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 306–315. (In Russian)
 40. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Stsenarnoe prostranstvo postroeniya planovogo grafika dvizheniya poezdov metropolitena [Scenario space for constructing a planned schedule for the movement of metro trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2012, Iss. 1, pp. 51–56. (In Russian)
 41. Balandin D. V., Kuzenkov O. A., Vil'danov V. K. Programmnyy modul' dlya postroeniya optimal'nogo grafika pererabotki syr'ya [Software module for constructing an optimal raw material processing schedule]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education]. 2021, vol. 17, Iss. 2, pp. 442–452. (In Russian)
 42. Ermakov O. A., Brozgunova N. P. Python kak instrument dlya analiza dannykh [Python as a tool for data analysis]. *Nauka i Obrazovanie* [Science and Education]. 2020, vol. 3, Iss. 4, pp. 26. (In Russian)
 43. Rozhkov A. V. Eksperimental'naya matematika v KUBGU pervye rezul'taty. *Nauka. Informatizatsiya. Tekhnologii. Obrazovanie: materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ekaterinburg, 1–5 marta 2021 goda* [Experimental mathematics at KUBGU — first results. Nauka. Informatization. Technologies. Education: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, March 1–5, 2021]. Ekaterinburg: Rossiyskiy gosudarstvennyy professional'no-pedagogicheskiy universitet Publ., 2021, pp. 163–172. (In Russian)
 44. Buyanova I. V., Zamulin I. S. Primenenie priblizheniya s pomoshch'yu krivykh dlya opredeleniya vychislitel'noy slozhnosti resheniy zadach po programmirovaniyu [Application of approximation using curves to determine the computational complexity of solutions to programming problems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. 2022, Iss. 5-2, pp. 232–236. (In Russian)
 45. Novikov V. G., Safronov A. I., Kuzukov V. A. Mikroprotsessornye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov v Moskovskom metropolitene [Microprocessor control systems for train traffic in the Moscow Metro]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 3, pp. 268–293. (In Russian)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ

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

НАСЕДКИН Олег Андреевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹; e-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

ЛЫКОВ Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹; e-mail: bastdrew@mail.ru

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

ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры³;
e-mail: khomonenko@pgups.ru

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

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

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

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Информационные и вычислительные системы», Санкт-Петербург

Рассмотрены тенденции развития систем микропроцессорных централизаций. Основной акцент при их создании сделан на достижение показателей безопасности не хуже, чем у релейных аналогов. Последующие шаги совершенствования систем определили направления расширения информационного обеспечения и автоматизации управления. Основным преимуществом компьютерных систем стала программная реализация ряда традиционных функций, которые требовали установки дополнительной релейной аппаратуры. Использование между компонентами системы цифровых стыков позволяет на основе стандартной аппаратуры проектировать распределенную структуру микропроцессорной централизации, обеспечивая рациональное использование производительности вычислительных средств. Современные интеллектуальные технологии в составе решаемых в микропроцессорных системах централизации задач обеспечивают не только выбор лучших технологических решений по организации работы станции, но и позволяют исключить неправильные действия персонала, освободить его от выполнения рутинных операций.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики; микропроцессорная централизация; интеллектуальные функции управления; система поддержки принятия решений.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71

▼ Введение

Широкое использование микропроцессорной техники — это неотъемлемый атрибут развития мировой и отечественной промышленности. Не составляют исключения и системы управления, применяемые на железнодорожном транспорте. После преодоления некоторого недоверия к микропроцессорным и программируемым компонентам в конце 80-х — начале 90-х гг. прошлого столетия началось масштабное тиражирование компьютерных станционных и перегонных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) [1–7]. Сегодня пройден путь создания микропроцессорных аналогов релейных систем, а основной акцент в новых системах направлен на их дальнейшее развитие с учетом возможностей элементной базы и

современных требований к системам управления, в том числе на основе реализации интеллектуальных функций.

1. Основные предпосылки и направления развития микропроцессорных ЖАТ

Рост производительности вычислительных средств, высокая скорость передачи данных, применение программного обеспечения для решения прикладных задач — все это определило новый взгляд на развитие микропроцессорных систем железнодорожной автоматики.

Большинство разработчиков в части определения программно-аппаратных платформ СЖАТ стали использовать универсальные технические решения, область применения которых не ограничивалась бы конкретным назначением, а была возможность их применения для

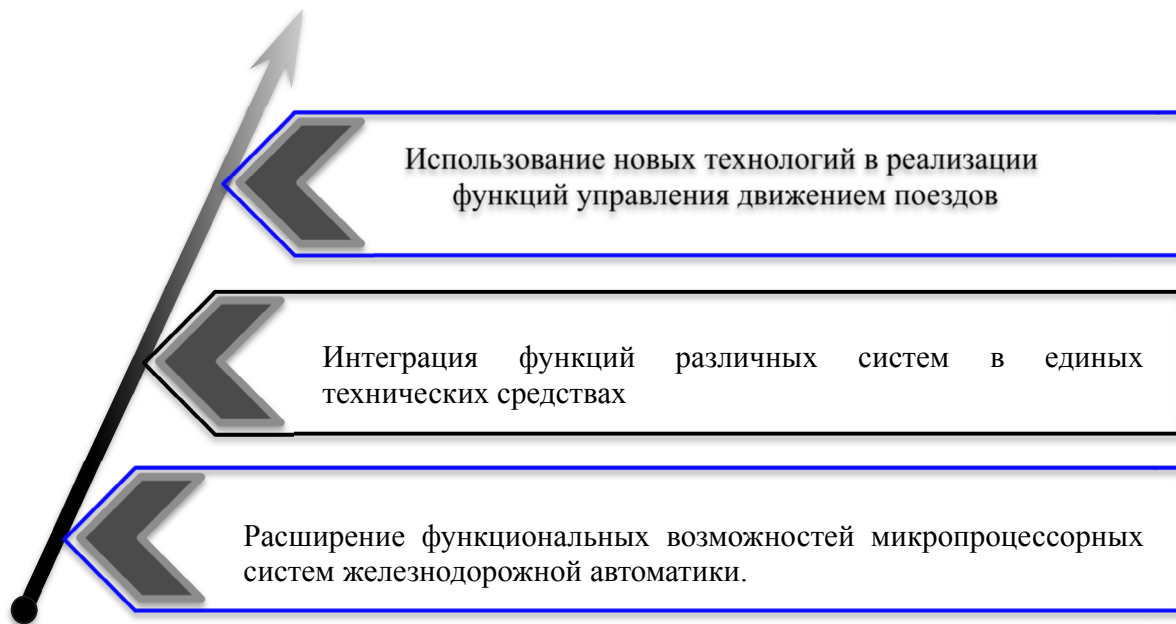


Рис. 1. Основные направления развития СЖАТ

более широкого круга задач [5–11]. В результате этого стали появляться программно-аппаратные решения, где основная нагрузка ложится на программное обеспечение, за счет которого достигаются требуемая функциональность и большая гибкость данных комплексов. Такой подход значительно упростил задачу разработчиков систем, оставив вопрос специализации оборудования только для решения задач сопряжения с объектами управления. Однако возрастающая роль программного обеспечения выдвинула ряд задач, не характерных для ранее применяемых систем. Встал вопрос о качестве программного обеспечения и, как следствие, о методах и средствах его оценки. Использование программного обеспечения в микропроцессорных СЖАТ способствовало увеличению алгоритмической сложности систем, а также увеличению взаимных связей компонентов системы, по сравнению с релейными и электронными системами.

В микропроцессорных СЖАТ появилась возможность учитывать на программном уровне большее число условий, определяющих эффективность управления технологическим процессом и повышение его уровня безопасности, а также возможность эффективной реализации вычислительных алгоритмов.

Применение современных технических средств совпало с преобразованиями в железнодорожной отрасли, одной из целей которых

стала минимизация затрат на всех стадиях жизненного цикла систем.

На основе анализа результатов деятельности разработчиков устройств СЖАТ для достижения указанной цели можно выделить следующие основные направления их развития (рис. 1).

2. Расширение функциональных возможностей

Следствием применения программного обеспечения в СЖАТ стало расширение их функциональных возможностей. Одним из первых шагов разработчиков микропроцессорных систем стало проектирование новых дополнительных функций как технологического, так и информационно-сервисного характера. Прежде всего основное внимание было направлено на *повышение безопасности движения поездов*.

К функциям, ориентированным на решение этой группы задач, можно отнести:

- контроль логической занятости путей, участков пути и стрелочно-путевых секций при занятии их маршрутным порядком с целью защиты от потери шунта;
- проверка условий безопасности при пользовании пригласительным сигналом. В этом случае выполняется задание маршрута, в котором из проверок исключаются только неисправные элементы;

- снятие кодирования секций маршрута при несанкционированном выезде подвижной единицы на маршрут;
- запрет движения через отдельные устройства, например, при производстве работ. Функция запрета движения реализуется либо через блокировку (исключение из пользования) светофора, либо элемента путевого плана (рельсового участка, стрелки).

Практика применения зарубежных систем путем их технической и алгоритмической адаптации способствовала частичному заимствованию ряда эксплуатационных требований, применяемых на европейских железных дорогах. На ряде объектов были реализованы функции боковой защиты маршрутов и замыкание элементов за маршрутом приема.

Функциями, повышающими *оперативность действий эксплуатационного персонала*, являются:

- индивидуальные выдержки времени для каждого отменяемого маршрута без ограничения числа размыкаемых маршрутов, в том числе одной категории;
- индивидуальные выдержки времени для каждой искусственно размыкаемой секции;
- возможность задания режима автодействия в любом поездном маршруте;
- возможность накопления маршрутов;
- изменение зон управления оперативного персонала.

Функции, направленные на *расширение информационного обеспечения и контроль действия эксплуатационного персонала*:

- оперативное предоставление дежурному по станции (ДСП) сведений нормативно-справочного характера о местных особенностях станции, данных отраслевых стандартов и технико-распорядительного акта станции.
- формирование на экране автоматизированного рабочего места ДСП текстовых и речевых сообщений о ходе технологического процесса и нарушениях функционирования технических средств;
- протоколирование и архивация технологического процесса, действий ДСП, результатов диагностики устройств ЖАТ и самодиагностики аппаратуры централизации.

3. Интеграция функций различных систем в единых технических средствах

Наличие безопасных вычислительных средств на станции при ее оборудовании системой микропроцессорной централизации и общая тенденция, связанная с централизацией оборудования перегонных систем интервального регулирования на станционном посту управления, определили возможность объединения этих систем в одних технических средствах [12–15]. В 2002 г. такой вариант был применен на участке Мга — Назия — Жихарево — Войбокало. В связи с необходимостью реализации функций контроля последовательного занятия и освобождения при проследовании поезда по рельсовым цепям перегона (ранее такая функция предусматривалась только в станционных системах) программный вариант значительно уменьшил объем оборудования. При этом используемая архитектура технических средств станционных систем позволила повысить безотказность в части выполнения функций интервального регулирования на перегонах.

В этот же блок задач входит использование программных средств для последовательного перевода стрелок в маршрутах в случаях ограниченной мощности питающих установок на отдельных пунктах, двукратный перевод стрелок, контроль продолжительности перевода стрелок и их отключение при работе на фрикцию.

Применение микропроцессорных систем диспетчерской централизации на участках, станции которых были оборудованы релейными системами электрической централизации, предполагало применение программно-аппаратных средств контролируемого пункта, т. е. технических средств, позволяющих реализовать дистанционное безопасное адресное управление станционным оборудованием. С появлением на станции микропроцессорных систем централизации эту функцию взял на себя безопасный вычислительный комплекс. Высокая производительность вычислительных средств позволяет решать и другие вспомогательные функции [13].

Так, используя вычислительные ресурсы средств микропроцессорной централизации (МПЦ), аналогичным образом решаются

задачи самодиагностики, диагностики и удаленного мониторинга устройств ЖАТ, функции оповещения работающих на путях, управление режимами пневмоочистки стрелочных переводов, информирования пассажиров о движении поездов и др. Этим достигается не только сокращение аппаратного обеспечения, но и внешних стыков, которые проектировались для увязки систем [14].

4. Интеллектуальные функции управления

До 80 % информации ДСП получает посредством зрения, поэтому при проектировании средств отображения информации (СОИ) необходимо учитывать не только технические нормы, но и согласованность технических средств с психологическими и физиологическими особенностями человека. На рис. 2 представлены виды СОИ, применяемые в МПЦ.

Эти устройства более универсальны, их монтаж можно осуществить в рабочем помещении ДСП за короткое время (1–2 ч), однако их использование, как правило, требует несколько больших начальных капиталовложений по сравнению с традиционным табло. На компьютерных СОИ можно отображать не только информацию о поездном положении на станции, но и различную текстовую, нормативно-справочную информацию, информацию от видеокамер и т. п. Кроме того, на одном и том же экране поочередно можно отображать диагностические и справочные данные, информацию из автоматизированной системы оперативного управления перевозками и т. п. Учитывая прогресс в

совершенствовании мониторов и видеопроекторов, а также их возможности в отображении графической, многоцветной информации, по показателям качества следует отдать предпочтение жидкокристаллическим СОИ.

Возможности использования терминальных устройств компьютерной техники существенно меняют пользовательский интерфейс у ДСП:

- использование более широкой цветовой палитры для индикации состояний объектов;
- изображение на путевом плане увеличенного перечня объектов с детализацией их элементов;
- применение функций масштабирования и прокрутки (скроллинга) изображений;
- многооконный режим для представления различного вида информации;
- гибкость перенастройки статической информации при изменениях, например, путевого развития;
- возможность декомпозиции зоны управления ДСП в случаях необходимости привлечения второго дежурного;
- для крупных станций использование выносных видеопроекторных табло, плазменных и жидкокристаллических панелей;
- удобный порядок действий по установке маршрутов посредством манипуляторов типа «мышь».

Проектирование функции установки маршрута осуществляется с исключением ошибок ДСП при неправильных действиях. Этим

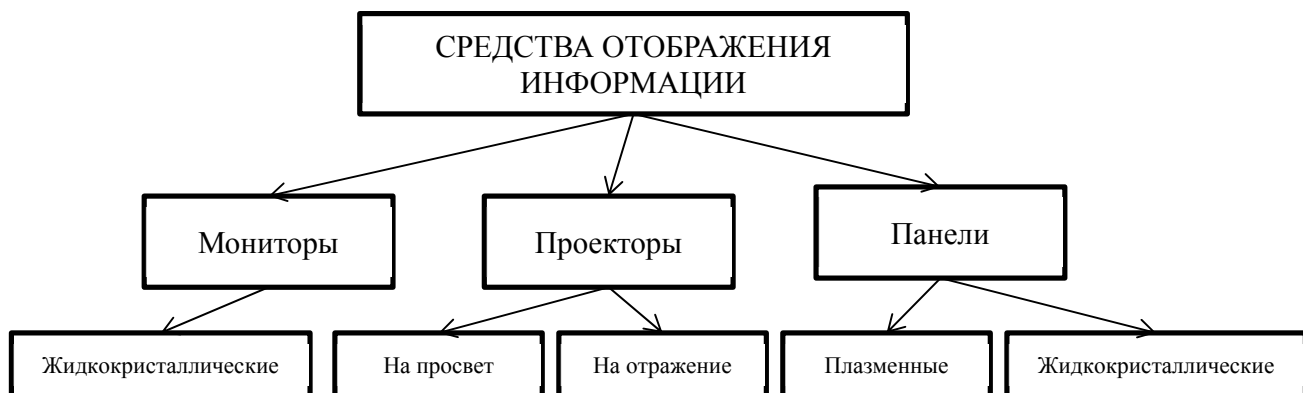


Рис. 2. Виды средств отображения информации

Прибытие					Отправление				
Время	Поезд	Откуда	Куда	Примечание	Время	Поезд	Откуда	Куда	Примечание
1:30	31	Глухозерская II	Хельсинки-Москва		0:00	6	3	Глухозерская	
12:26	35	Полострово	8	Хельсинки	17:50	22	7А	3.Пост-2	Мурманск
18:01	73	3.Пост-2	10	Свердловск	18:15	6786	5/7А	3.Пост-2	Невдубстрой
18:11	657	3.Пост-2	10	Петрозаводск	18:50	74	8	Глухозерская	Свердловск
18:41	687	3.Пост-2	9	Вологда	19:14	6246	7А	3.Пост-2	Пушицево, Загонкой п.5786 (18-00)
19:05	249	Полострово	9	Костомукша	19:22	6236	5/7А	3.Пост-2	Мга
19:28	6823	3.Пост-2	8	Под п.6236	19:26	6388	4А	3.Пост-2	Будогощь, Загонкой п.5388 (18-45)
20:00	6413	Полострово	7А/5	Под п.6786	19:31	34	8	Полострово	Хельсинки
20:08	6865	Полострово	7А	Под п.6208	19:41	32	8	3.Пост-2	Москва-Хельсинки
20:27	6415	3.Пост-2	7А/5	Под п.6790	20:03	190	8	3.Пост-2	Архангельск
21:25	187	3.Пост-2	8	Воркута	20:18	6208	7А	3.Пост-2	Мга
21:38	21	3.Пост-2	9	Мурманск - Вологда	21:35	31	8	Глухозерская	Хельсинки-Москва
22:27	33	Полострово	8	Хельсинки	22:10	250	11	Полострово	Костомукша
23:03	6837	3.Пост-2	7А/6	Под п.6220	23:31	36	8	Полострово	Хельсинки
23:25	15	3.Пост-2	9	Мурманск-Москва					

- Операция выполняется в настоящий момент
- Выполнение операции просрочено
- Указание на операцию с поездом, прибытие которого ожидается в настоящий момент
- Операция ожидает подхода времени выполнения
- Операция успешно выполнена

Рис. 3. Вид программной реализации электронного плана работы ст. Санкт-Петербург-Ладужский

сокращается количество ошибок ДСП и необходимость пользования отменой маршрутов, которая связана с временными задержками размыкания маршрутов, что нередко влечет задержки поездов. Например, введены режимы задания поездных и маневровых маршрутов, индикация только доступных в каждом случае точек концов маршрутов, подсказки последовательности действий, возможность задания маршрутов безостановочного пропуска по любому из путей, контроль последовательности и регламента действий при пользовании ответственными командами и др.

Выполнение функций автоматической установки маршрутов (АУМ) позволило исключить традиционное релейное оборудование и стивы. При этом жесткая функциональность релейных АУМ позволяла автоматизировать только задание маршрутов по трем путям по простейшим алгоритмам, связанным лишь с состоянием рельсовых цепей. Это зачастую приводило к остановке перевозочного процесса, поскольку не всегда требовалось приготовление поездных маршрутов, например, для прибывающего сборного поезда. В МПЦ промежуточных станций программный АУМ может реализовывать план работы поездного диспетчера на предстоящие 2–3 часа, что достигается передачей на станцию массива

предстоящих передвижений из планового графика поездного диспетчера, возможностью его хранения и актуализации в памяти устройства вычислительного комплекта.

На крупных станциях с учетом контроля последовательности прибытия поездов системы МПЦ позволяют реализовать функции автопилота, т. е. обеспечить автоматическое задание маршрутов на основе использования плана расписания передвижений из электронной ведомости занятия перронных путей — ВЗП (рис. 3). ВЗП представляет собой электронную таблицу, состоящую из двух основных частей (колонок): отправление и прибытие. Задержанные по отправлению поезда или неприбывшие помечаются красным цветом и дополняются специальным указателем просроченной операции. Отправляющийся поезд, который оказался первым в очереди, назначается актуальным, в ВЗП он выделяется жирным шрифтом. За пять минут до наступления момента отправления автоматически готовится маршрут отправления и открывается светофор. Машинист передает информацию о назначении электропоезда и правилах проезда пассажиров, после чего закрывает двери и приводит поезд в движение. Для прибывающих поездов после занятия второго участка приближения также после идентификации

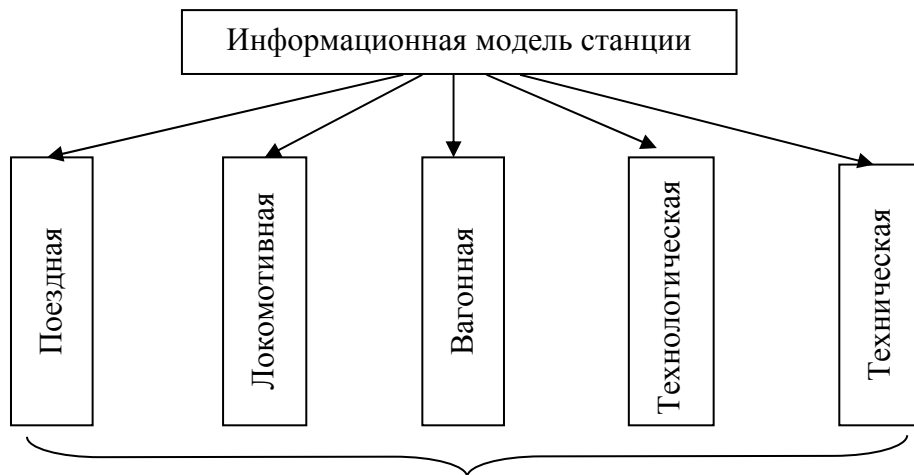


Рис. 4. Информационная модель управления станцией

номера автоматически идет приготовление маршрута на соответствующий путь согласно ВЗП. В автопилоте в ритме текущего времени с учетом необходимых технологических событий реализуются и маневровые маршруты, которые связаны с поездами (подача составов под поезда, уборка электропоездов на пути отстоя, уборка/подача поездных локомотивов из депо, другие виды маневров согласно технологическому процессу работы станции). После начала использования маршрута курсоры в соответствующих колонках перемещаются на следующую строку ВЗП для выполнения очередного алгоритма.

В практической деятельности пользователей (оперативного и обслуживающего персонала) информационная модель является источником информации, на основе которого формируется образ реальной поездной обстановки, производится анализ и формируются управляющие действия в системе. Полноту описания информационной модели определяют ее адекватность, а, следовательно, и эффективность системы управления. Действительно, чтобы принять решение об установке маршрута, предварительно необходимо оценить ситуацию на станции по многим составляющим технологического процесса. Поскольку конечной целью перевозочного процесса является целенаправленное перемещение подвижных единиц (поездов, вагонов, локомотивов), то для организации любого перемещения исходными данными является точное знание места,

назначения, состояния каждой единицы, технологического состояния систем и подразделений, технического состояния устройств.

Обобщенная структура информационной модели технологического процесса станции представлена на рис. 4. Источниками информации для динамического функционирования моделей являются прежде всего технические средства автоматизации — средства автоматической идентификации подвижных объектов, контроля состояния напольных устройств (стрелок, светофоров, рельсовых участков), устройства контроля нагретых аварийных букс (КТСМ, ПОНАБ) и др., а также формируемые на основе данных о перемещениях сведения о расположении подвижных единиц на станции. Фактически техническая модель — единственная модель перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, которая функционирует в автоматическом режиме на основе оперативных данных от устройств.

Источниками информации (см. рис. 4) являются:

- устройства ЭЦ;
- техническая контора;
- пункт технического осмотра;
- пункт коммерческого осмотра;
- товарная контора;
- локомотивное депо;
- эксплуатационно-технический персонал;
- подсистемы диагностики (АПК-ДК, ПОНАБ, КТСМ и др.).

До настоящего времени не решены вопросы автоматической идентификации вагонов, локомотивов и поездов, а необходимые данные получают путем ручного ввода операторами. Внедряемые системы автоматической идентификации «Лотос» и «Пальма» не получили распространения на сети железных дорог [16]. Это не позволяет вести вагонные, локомотивные и поездные модели в привязке к расположению подвижных единиц на станции.

Трудно формализуемые процессы сбора информации о технологическом положении на станции (динамика процессов погрузки/выгрузки на фронтах, исправность технических средств механизации и др.) компенсируются путем переговоров и запросов данных и также не автоматизированы.

Эти обстоятельства и предопределяет режим функционирования МПЦ как автоматизированный, а исключение персонала на данном этапе в принципе невозможно.

При этом задачами систем управления, построенными с «интеллектуальной составляющей», являются:

- подсказки о допустимости реализации команды с целью исключения ошибок, которые в будущем вызовут задержки передвижений;
- логический контроль работы устройств и последовательность свершения технологических событий с активным воздействием на алгоритмы системы управления;
- формирование прогноза с реализацией автоматического действия на согласованный предстоящий период в несколько часов при условии соблюдения допусков отклонений параметров технологического процесса;
- подсказки и блокирование состояний в системе при вспомогательном управлении, возникновении отказов, иных нестандартных ситуациях.

Для каждой из перечисленных задач при программной реализации соответствует набор функций и алгоритмов, который должен быть неотъемлемым атрибутом компьютерной системы управления, обладающей искусственным интеллектом для организации безопасного перевозочного процесса.

Заключение

1. Первостепенной задачей разработчиков при создании первых систем МПЦ было достижение на новой микропроцессорной элементной базе показателей безопасности не хуже, чем в релейных системах, а также расширение функций, связанных с обеспечением безопасности.

2. Важнейшим источником технико-экономической эффективности в МПЦ явилась интеграция в составе УВК функций систем и подсистем (диспетчерской централизации, диспетчерского контроля, интервального регулирования и др.).

3. Основным условием повышения эффективности систем МПЦ является расширение информационного обеспечения и автоматизация функций управления с использованием методов искусственного интеллекта и поддержки принятия решений с целью исключения и минимизации ошибок персонала.

4. Эффективное управление работой станции может быть обеспечено непрерывным ведением информационных моделей (вагонной, поездной, локомотивной, технологической и технической), функционирующих в автоматическом режиме на основе данных, поступающих в реальном масштабе времени. Это является условием построения достоверного прогноза состояния технологического процесса работы станции с перспективой функций автопилота. ▲

Библиографический список

1. Системы микропроцессорной централизации. Международный обзор // Железные дороги мира. — 1997. — № 8. — С. 8–17.
2. Сапожников Вл. В. Анализ компьютерных систем оперативного управления устройствами ЭЦ / Вл. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. — 2006. — № 6. — С. 6–8.
3. Гавзов Д. В. Релейно-процессорная централизация ЭЦ-МПК / Д. В. Гавзов, А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. — 2002. — № 4. — С. 12–15.
4. Крылов А. Ю. Система управления движением поездов «Диалог» / А. Ю. Крылов и др. // Автоматика, связь, информатика. — 2004. — № 6. — С. 23–26.
5. Долгий И. Д. Возможности релейных и процессорных систем управления станцией / И. Д. Долгий // Автоматика, связь, информатика. — 2010. — № 5. — С. 25–27.
6. Каменев А. И. Система управления малыми станциями РПЦ-ДОН / А. И. Каменев, И. Д. Долгий, А. Г. Кулькин // Автоматика, связь, информатика. — 2007. — № 5. — С. 5–7.

7. Яценко В. В. Система микропроцессорной централизации ЭЦ-ЕМ и автоблокировки / В. В. Яценко // Автоматика, связь, информатика. — 2004. — № 6. — С. 10–13.
8. Протцнер С. Система микропроцессорной централизации МПЦ-МЗ-Ф на основе платформы Simis для Российских железных дорог / С. Протцнер, С. В. Власенко, Ю. С. Смагин и др. // Железные дороги мира. — 2010. — № 10. — С. 56–60.
9. Протцнер С. Системы микропроцессорной централизации компании Siemens в Литве / С. Протцнер, С. В. Власенко, Р. Стадалюс и др. // Железные дороги мира. — 2009. — № 9. — С. 56–61.
10. Милехин Д. А. Перспективы применения платформы SIMIS в системах управления движением поездов на железных дорогах России / Д. А. Милехин, Ю. С. Смагин, О. Ю. Шатковский // Железные дороги мира. — 2012. — № 7. — С. 59–62.
11. Riesbeck T. Передача данных по технологии DSL в МПЦ ESTW L90 / T. Riesbeck, K. Eisermann // Железные дороги мира. — 2011. — № 11. — С. 58–60. (Перевод статьи из журнала Signal und Draht, 2011, № 6, pp. 6–9)
12. Roiser K. Жизненный цикл систем МПЦ / K. Roiser, Ch. Scharm // Железные дороги мира. — 2007. — № 5. — С. 65–69. (Перевод статьи из журнала Signal und Draht, 2006, № 6, pp. 15–18.)
13. Никитин А. Б. Обоснование экономической безопасности железнодорожного транспорта на базе интеллектуальных компьютерных систем оперативного управления движением поездов / А. Б. Никитин // Инновации и инвестиции. — 2016. — № 7. — С. 152–155.
14. Безродный Б. Ф. Кибербезопасность микропроцессорных систем железнодорожной автоматики / Б. Ф. Безродный, И. А. Наседкин, Р. С. Бакуркин и др. // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 12. — С. 4–8. — DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.002.
15. Никитин А. Б. Метод расчета стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 117–129.
16. Федоров В. Г. Система радиочастотной идентификации САИД «Пальма» на железнодорожном транспорте / В. Г. Федоров // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 3. — С. 18–21.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 63–71
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71

Intelligent Control Functions in Microprocessor Interlocking Systems

Information about authors

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

E-mail: nikitin@crtc.spb.ru

Nasedkin O. A., PhD in Engineering, Associate Professor¹.

E-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

Lykov A. A., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: bastdrew@mail.ru

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

E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Khomonenko A. D., Doctor in Engineering, Professor³.

E-mail: khomonenko@pgups.ru

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

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

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

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, "Information and Computing Systems" Department, St. Petersburg

Abstract: Trends in the development of computer-based interlocking systems are considered. The main emphasis when creating them is on achieving safety indicators not worse than those of relay analogues. The system improvement subsequent steps defined expansion directions for informational provision and management automation. Main advantage of computer systems has become the software implementation of a series of traditional functions that required the installation of additional relay equipment. The use of digital joints between the system components makes it possible to design distributed structure of computer-based interlocking systems on standard equipment basis, ensuring rational use of computing resource productivity. Modern intelligent technologies as a part of the tasks, being solved in computer-based

interlocking systems, provide not only for the choice of the best technological solutions on work organization of a station but also allow to exclude personnel incorrect actions, to free personnel from routine operation implementation.

Keywords: railway automation and remote controlling systems; computer-based interlocking systems; intelligent control functions; decision-making support system.

References

1. Sistemy mikroprotsessornoy tsentralizatsii. Mezhdunarodnyy obzor [Systems of microprocessor centralization. International review]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 1997, Iss. 8, pp. 8–17. (In Russian)
2. Sapozhnikov V. I., Nikitin A. B. Analiz komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya ustroystvami ETs [Analysis of computer systems for operational control of EC devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2006, Iss. 6, pp. 6–8. (In Russian)
3. Gavzov D. V., Nikitin A. B. Releyno-protsessornaya tsentralizatsiya ETs-MPK [Relay-processor centralization of EC-MPK]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2002, Iss. 4, pp. 12–15. (In Russian)
4. Krylov A. Yu. et al. Sistema upravleniya dvizheniem poezdov "Dialog" [Train traffic control system "Dialogue"]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2004, Iss. 6, pp. 23–26. (In Russian)
5. Dolgij I. D. Vozmozhnosti releynykh i protsessornykh sistem upravleniya stantsiy [Possibilities of relay and processor control systems of the station]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2010, Iss. 5, pp. 25–27. (In Russian)
6. Kamenev A. I., Dolgij I. D., Kul'kin A. G. Sistema upravleniya malymi stantsiyami RPTs-DON [Control system for small stations ROC-DON]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2007, Iss. 5, pp. 5–7. (In Russian)
7. Yatsenko V. V. Sistema mikroprotsessornoy tsentralizatsii ETs-EM i avtobloirovki [System of microprocessor interlocking EC-EM and auto-blocking]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2004, Iss. 6, pp. 10–13. (In Russian)
8. Protsner S., Vlasenko S. V., Smagin Yu. S. et al. Sistema mikroprotsessornoy tsentralizatsii MPTs-MZ-F na osnove platformy Simis dlya Rossiyskikh zheleznykh dorog [Microprocessor-based interlocking system MPTs-MZ-F based on the Simis platform

- for Russian Railways]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World]. 2010, Iss. 10, pp. 56–60. (In Russian)
9. Protsner S., Vlasenko S. V., Stadyus R. et al. Sistemy mikroprotssornoy tsentralizatsii kompanii Siemens v Litve [Microprocessor-based interlocking systems of the Siemens company in Lithuania]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World]. 2009, Iss. 9, pp. 56–61. (In Russian)
 10. Milekhin D. A., Smagin Yu. S., Shatkovskiy O. Yu. Perspektivy primeneniya platformy SIMIS v sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznykh dorogakh Rossii [Prospects for using the SIMIS platform in train traffic control systems on Russian railways]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World]. 2012, Iss. 7, pp. 59–62. (In Russian)
 11. Riesbeck T., Eisermann K. Peredacha dannykh po tekhnologii DSL v MPTs ESTW L90 [Data transmission using DSL technology in the MPC ESTW L90]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World]. 2011, Iss. 11, pp. 58–60. (Perevod stat'i iz zhurnala Signal und Draht, 2011, № 6, pp. 6–9.) [Translation of an article from Signal und Draht, 2011, no. 6, pp. 6–9] (In Russian)
 12. Roiser K., Scharm Ch. Zhiznennyi tsikl sistem MPTs [Life cycle of MPC systems]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World]. 2007, Iss. 5, pp. 65–69. (Perevod stat'i iz zhurnala Signal und Draht, 2006, № 6, pp. 15–18.) [Translation of article from Signal und Draht, 2006, no. 6, pp. 15–18] (In Russian)
 13. Nikitin A. B. Obosnovanie ekonomicheskoy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta na baze intellektual'nykh komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya dvizheniem poezdov [Justification of the economic security of railway transport based on intelligent computer systems for the operational management of train traffic]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2016, Iss. 7, pp. 152–155. (In Russian)
 14. Bezrodnyy B. F., Nasedkin I. A., Bakurkin R. S. et al. Kiberbezopasnost' mikroprotssornykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Cybersecurity of microprocessor systems of railway automation]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2020, Iss. 12, pp. 4–8. DOI: 10.34649/AT.2020.12.12.002. (In Russian)
 15. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Metod rascheta stoimosti zhiznennogo tsikla sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemehaniki [Method for calculating the cost of the life cycle of systems of railway automation and remote control]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 117–129. (In Russian)
 16. Fedorov V. G. Sistema radiochastotnoy identifikatsii SAID "Pal'ma" na zheleznodorozhnom transporte [System of radio frequency identification SAID "Palma" on railway transport]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2006, Iss. 3, pp. 18–21. (In Russian)

МЕХАНИЗМ ДИАГНОСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры¹; e-mail: kovalev_kostia@mail.ru
НОВИЧИХИН Алексей Викторович, д-р техн. наук, профессор¹; e-mail: novitchihin@bk.ru
САКОВИЧ Игорь Леонтьевич, канд. экон. наук, доцент кафедры¹, первый заместитель начальника по экономике, финансам и корпоративной координации²; e-mail: logist@pgups.ru
БОЛОТИН Валерий Алексеевич, канд. техн. наук, профессор кафедры¹; e-mail: spb-vab@yandex.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Логистика и коммерческая работа», Санкт-Петербург

²Октябрьская железная дорога – филиал ОАО «Российские железные дороги», Санкт-Петербург

Для идентификации проблем функционирования железнодорожных линий используются различные механизмы, в том числе механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, который позволяет повысить эффективность их функционирования. Предлагаемый механизм позволяет оценить текущее состояние малоинтенсивной железнодорожной линии и установить причинно-следственные связи, приводящие к убыточности линии, дать анализ показателей, которые в наибольшей степени оказывают негативное влияние на функционирование линии. Для этого применен метод когнитивного моделирования.

В статье разработана укрупненная когнитивная карта функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий, используемая для диагностики существующего состояния эксплуатации линии. Когнитивная карта состоит из концептов, связей между концептами и весовых значений связей. На основании когнитивной карты составлена матрица смежности, которая позволяет оценить достоверность и устойчивость нечеткой когнитивной карты по внешним и внутренним возмущениям. Рассчитаны характеристическое уравнение и собственные значения матрицы, которые позволяют дать оценку показателей когнитивной карты в виде влияния концептов на систему и системы на концепты. Установлены показатели нечеткой когнитивной карты, а именно консонанс влияния системы, диссонанс влияния системы, влияние концепта на систему, которые дают наиболее полное представление о внутренней структуре малоинтенсивной линии. Наибольшее положительное влияние на систему среди концептов оказывают «технические ресурсы», «персонал станций и участка» и «нормативная база». Наиболее значимое положительное влияние на перечисленные концепты позволяет повысить эффективность работы малоинтенсивных железнодорожных линий. Наибольшее отрицательное влияние на систему среди концептов оказывает концепт «Размеры движения» в связи с недостаточным количеством пар поездов в сутки, проходящих по линии.

Составлен план экспериментов для определения изменения параметров концептов «Производительность и эффективность» при оказании импульсных воздействий на концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка» с целью оценки их влияния на концепты «Производительности» и «Эффективности». При внесении импульсов в концепт «Функционального управления» и «Технические ресурсы» существенного изменения производительности и эффективности не наблюдается. При внесении импульсов в концепт «Персонал» наблюдается рост производительности и эффективности, что свидетельствует о возможности повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий путем положительного импульса на концепт «Персонал».

Ключевые слова: управление процессами перевозок; малоинтенсивные линии; механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий; когнитивное моделирование; импульсные процессы; железнодорожный транспорт.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86

▼ Введение

В современных условиях на железных дорогах Российской Федерации увеличивается необходимость эффективного использования малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ). Проблема функционирования и развития МИЛ рассмотрена в отечественных и

зарубежных исследованиях [1–9]. Анализ исследований показал отсутствие разработанного механизма диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, позволяющего оценить текущее состояние МИЛ. В связи с этим необходимы современные инструменты и механизмы, позволяющие

повысить эффективность работы МИЛ, путем определения полюсов роста, позволяющих повысить объемы перевозок на таких линиях.

Целью статьи является разработка механизма диагностики, который позволяет определить направления развития МИЛ, для того чтобы установить потребные объемы технических, технологических и экономических ресурсов, с применением когнитивных карт и импульсных воздействий на концепты. Механизм диагностики разработан с использованием синергетико-индикаторного подхода, который позволяет выявлять и исследовать причинно-следственные связи сложно структурированной системы с набором количественных и качественных показателей. Механизм диагностики позволяет устанавливать закономерности функционирования и прогнозировать возможные направления развития железнодорожных линий, в том числе МИЛ.

1. Разработка механизма диагностики эксплуатации МИЛ

По действующей методике классификации и специализации железнодорожных линий для МИЛ фактические размеры движения поездов составляют не более 8 пар поездов в сутки и грузонапряженность не более 5,0 млн т-км брутто/км в год¹. Проблема малоинтенсивных линий в современных условиях является малоизученной, хотя общая их протяженность составляет около 20 % от общей протяженности железнодорожной транспортной сети [10, 11].

Разработанный механизм диагностики эксплуатации МИЛ представлен на рис. 1. Отличием предлагаемого механизма является возможность моделирования различных сценариев развития для убыточных МИЛ после выполнения категоризации проблемных ситуаций с использованием когнитивного моделирования. Разработанный механизм позволяет установить факторы, приводящие к низкой эффективности функционирования МИЛ. Предлагаемый механизм позволяет формировать комплексные сценарии развития МИЛ в зависимости от внутренних и внешних факторов.

¹ Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р «Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД»». — Москва. — 8 с.

Диагностика начинается с ввода данных об участках МИЛ по дороге с их основными показателями. Далее производится оценка и анализ исходного состояния функционирования МИЛ на основе алгоритма Форда — Фалкерсона, который позволяет определить максимальный поток и минимальный разрез при представлении железнодорожной транспортной сети в виде ориентированного графа [12, 13].

Идеей конкретизации алгоритма является определение максимально возможного потока путем диагностики возможностей пропускной способности железнодорожной транспортной сети, что позволяет задействовать транзитные МИЛ при перевозке грузов на грузонапряженных и востребованных направлениях. Конкретизация алгоритма Форда — Фалкерсона [14, 15] заключается в том, что в качестве концептов приняты обратные значения классности станции, а в качестве ребер — обратные значения класса железнодорожной линии. Построив ориентированный граф с применением конкретизированного алгоритма Форда — Фалкерсона, выполняется диагностика проблемных ситуаций в функционировании линий. Большинство МИЛ являются убыточными и малоэффективными в связи с отсутствием потребности в перевозках в пассажирском и грузовом сообщении. Для повышения эффективности их работы разрабатываются возможные направления развития линий и определяются размеры ресурсов, необходимые для их реализации.

Диагностика работы МИЛ является сложно структурированной задачей, учитывающей количественные и качественные показатели. Если МИЛ не является убыточной, то алгоритм приводит к пункту оформления оперативного плана эксплуатационной работы МИЛ. Если МИЛ убыточна, необходима категоризация проблемных ситуаций, которая позволит выявить группы причин, приводящих к убыточности линий.

При наличии условия необходимости повышения доходности линии применен подход когнитивного моделирования, состоящий из следующих этапов: определение вершин и весовых значений связей; разработка нечеткой когнитивной модели с набором показателей; корректировка модели и проверка адекватности; планирование, моделирование и реализация

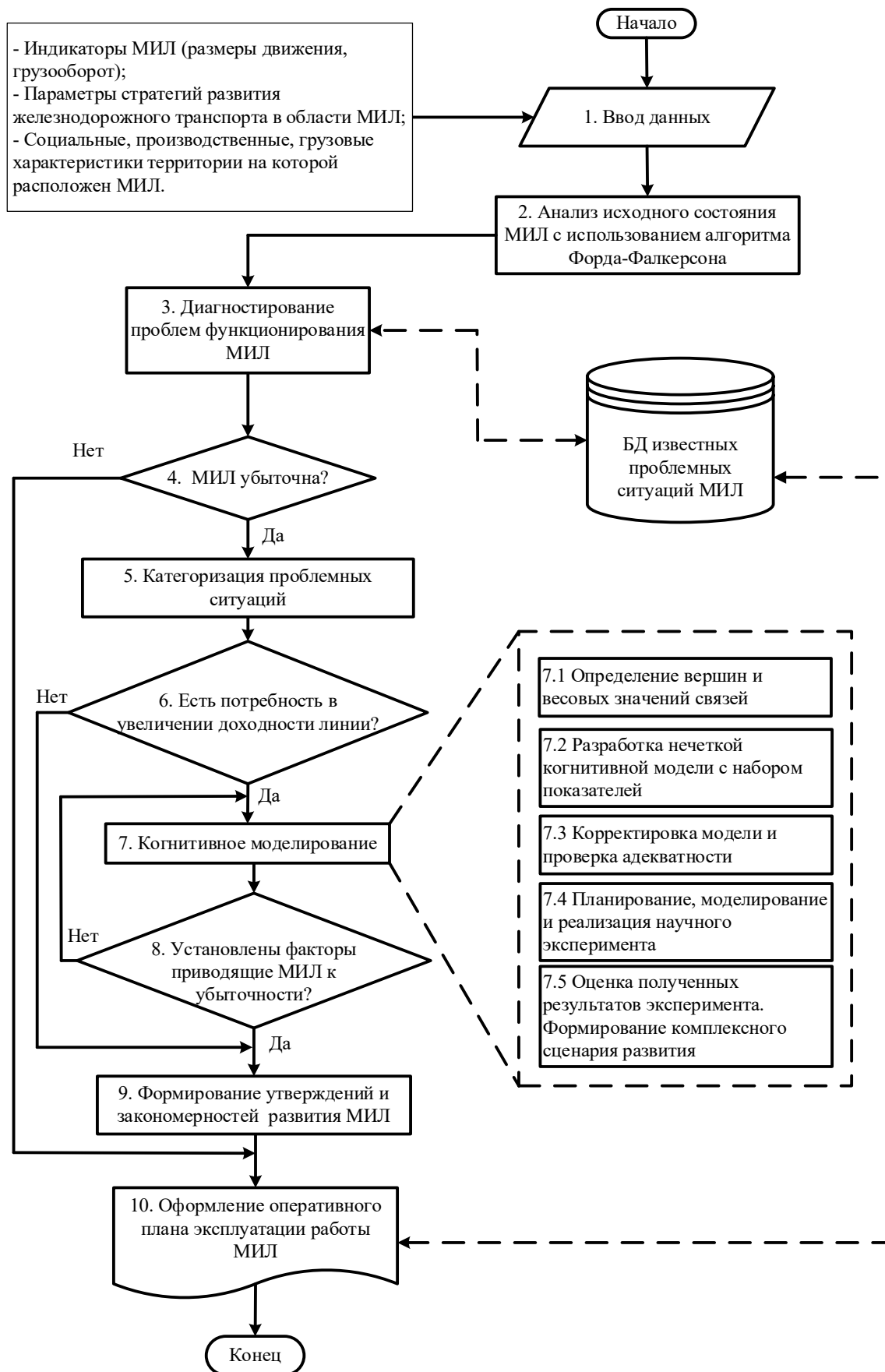


Рис. 1. Механизм диагностики эксплуатации МИЛ

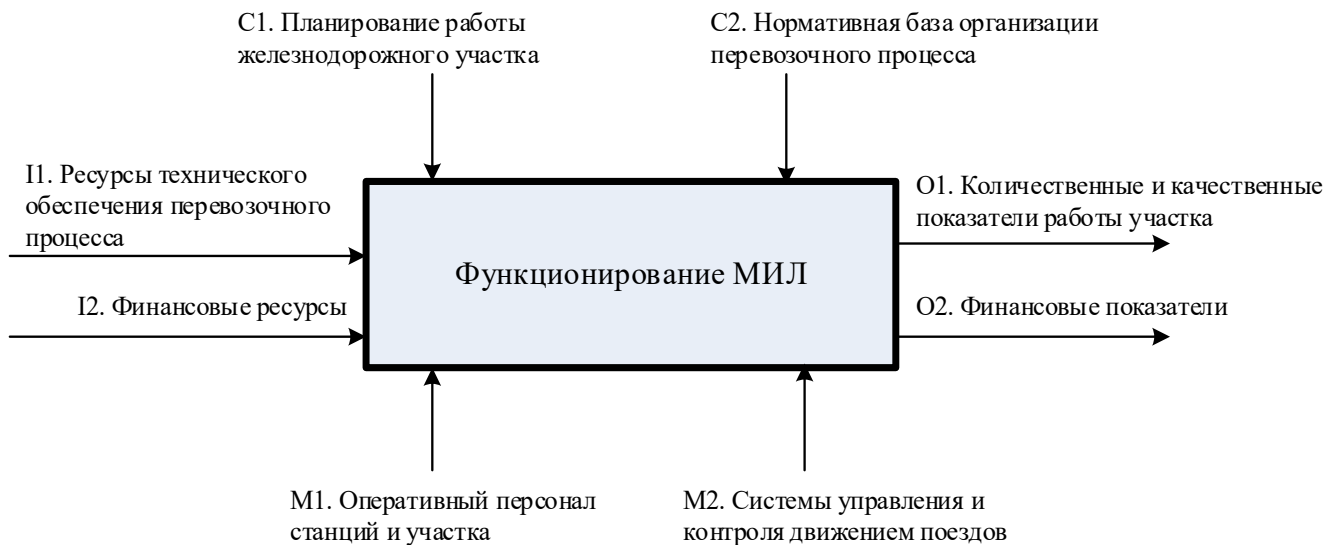


Рис. 2. Процесс функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0

научного эксперимента; оценка полученных результатов эксперимента [16–18].

На основании когнитивного моделирования установлены факторы, приводящие МИЛ к убыточности. Выполняется анализ состояния линии, направления развития для повышения доходности, и формируется оперативный план развития МИЛ. Для функционирования МИЛ необходимы различные ресурсы, в том числе затраты на содержание инфраструктуры, прогнозируемые размеры перевозок, работающий механизм расчета железнодорожных тарифов, затраты на тягу и прочие составляющие перевозочного процесса, которые необходимы для функционирования любой железнодорожной линии. Процесс функционирования железнодорожной линии (в том числе МИЛ) можно описать с помощью рис. 2, который получен на основе объектно-ориентированного подхода и реализован с использованием методологии функционального моделирования IDEF0², которая позволяет представить систему в виде набора взаимосвязанных функций. Не

использованы методологии *IDEFI*, *IDEFIX*, *IDEFIX (IDEFI Extended)*, *IDEF2*, *IDEF3*, *IDEF4*, *IDEF5* по причине того, что они не дают наглядного, достоверного и точного описания рассматриваемых процессов и предназначены для других функциональных областей [17].

Процесс функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0 детализирован в виде жизненного цикла железнодорожной линии (рис. 3). На основании жизненного цикла функционирования железнодорожной линии представлены существующие механизмы управления процессами перевозок, в которых указано место разработанного синергетико-индикаторного подхода к проблеме эксплуатации МИЛ. Под функционированием МИЛ $\sum P_i$ понимается соотношение технических $T(t)$, технологических $W(t)$ и экономических показателей $E(t)$ линии, которое можно представить в виде кортежа:

$$\sum P_i(t) \equiv \langle T(t), W(t), E(t) \rangle. \quad (1)$$

Причинно-следственные связи и корреляция взаимосвязанных процессов функционирования МИЛ трудно структурируемы. Для этого использован метод когнитивного моделирования, который позволяет учитывать взаимосвязи количественных и качественных факторов, конкретизирующих показатели МИЛ.

² IDEF0 — методология функционального моделирования и графическая нотация, предназначенная для формализации и описания бизнес-процессов. Отличительной особенностью IDEF0 является ее акцент на соподчиненность объектов. В IDEF0 рассматриваются логические отношения между работами, а не их временная последовательность.

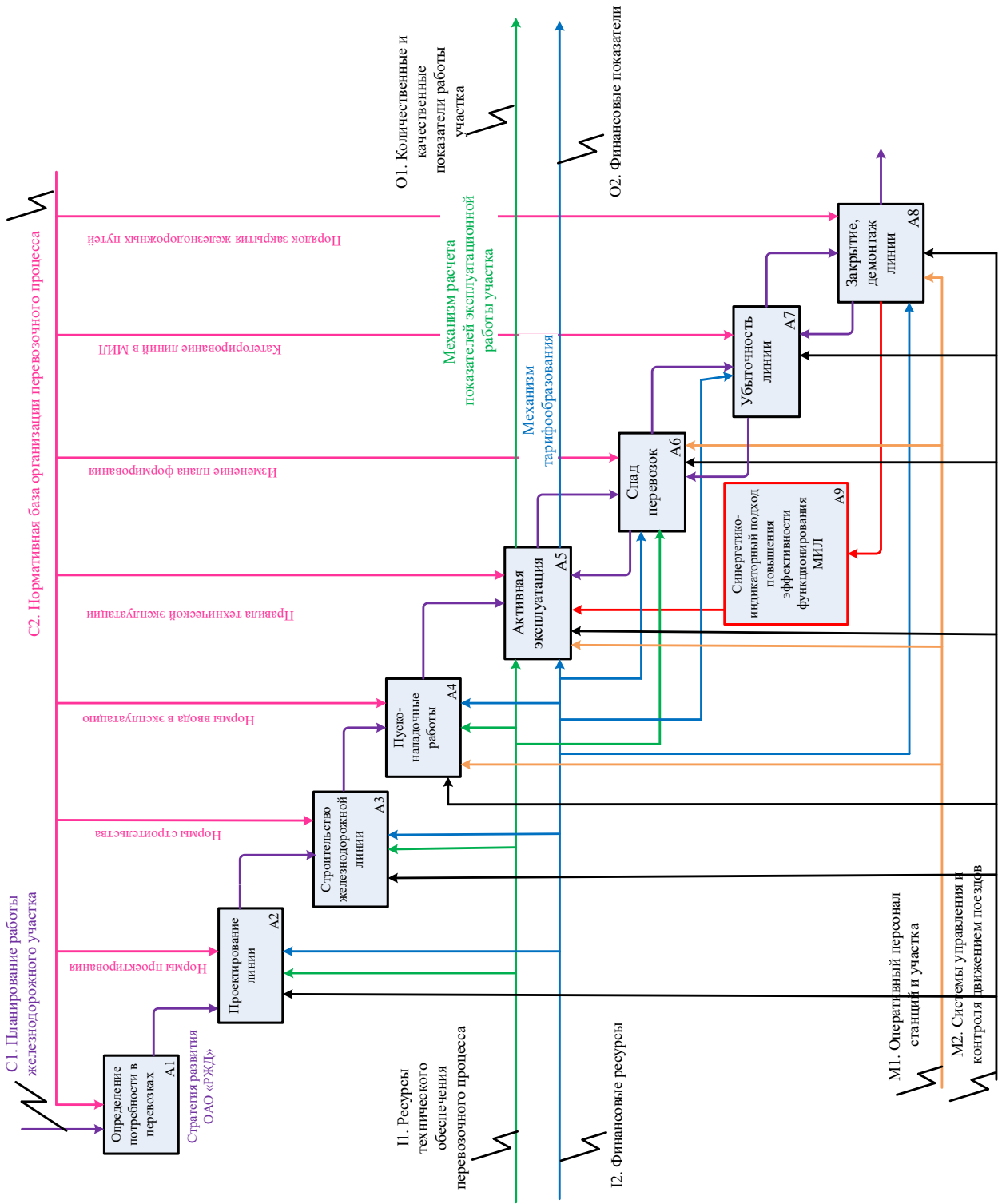


Рис. 3. Жизненный цикл функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEFO

2. Когнитивная модель функционирования МИЛ

Разработана укрупненная нечеткая когнитивная карта функционирования МИЛ для диагностики существующего состояния линии. Когнитивная карта состоит из множества концептов, связей между концептами и весовых значений связей [18]. Основой для определения концептов когнитивной карты является приведенный на рис. 2 процесс функционирования железнодорожной линии. Укрупненная когнитивная карта функционирования МИЛ представлена на рис. 4.

В когнитивную карту помимо элементов из рис. 2 добавлен концепт «V1. Размеры движения», который обуславливает работу линии. На основании укрупненной когнитивной карты составлена матрица (B) смежности когнитивной карты (2).

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & -0,6 & -0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (2)$$

Нечеткое множества не накладывает ограничений на выбор функции принадлежности. Использовано аналитическое представление функции принадлежности μ нечеткого множества (A), (7) с элементами x , нечетко обладающими определяющим множеством свойством R (3) упрощает соответствующие аналитические и численные расчеты при применении методов теории нечетких множеств. Выбрана треугольная функция принадлежности, используемая для задач, неопределенностей, которые характеризуются выражением:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{W(t) - x}{W(t) - T(t)}; T(t) \leq x \leq W(t); \\ 1 - \frac{x - W(t)}{E(t) - W(t)}; W(t) \leq x \leq E(t); \\ 0, \text{остальные случаи.} \end{cases} \quad (3)$$

При $(W(t) - T(t)) = (E(t) - W(t))$ применима симметричная треугольная функция принадлежности, которая состоит из кортежа параметров (1). При разработке когнитивной карты необходимо выполнить оценку устойчивости нечеткой карты к внешним импульсным воздействиям и внутренней структурной устойчивости. Условие структурной устойчивости нечеткой когнитивной карты, наличие нечетного числа циклов отрицательной обратной связи, а условие неустойчивости нечеткой когнитивной карты — наличие четного числа циклов положительной обратной связи. Для анализа устойчивости модели к внешним возмущениям необходимо составить характеристическое уравнение матрицы смежности.

Устойчивость системы к внешним возмущениям определяется на основании определения собственных значений матрицы смежности (2) и составления характеристического уравнения. Собственные значения матрицы:

$$\lambda_1 = 0; \lambda_2 = -\frac{3^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{50}}{10}; \lambda_3 = -\frac{\sqrt{42i}}{10};$$

$$\lambda_4 = \frac{\sqrt{42i}}{10}; \lambda_5 = -\frac{3 \cdot \sqrt[6]{3} \cdot \sqrt[3]{50i}}{20}; \lambda_6 = \frac{3 \cdot \sqrt[6]{3} \cdot \sqrt[3]{50i}}{20}.$$

На основании собственных значений матрицы смежности составлено характеристическое уравнение:

$$\lambda^8 + \frac{21\lambda^6}{50} + \frac{9\lambda^5}{20} + \frac{189\lambda^3}{1000} = 0. \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (4) собственные числа матрицы не превышают $|-1|$ и являются действительными числами. Структурная устойчивость определяется по количеству отрицательных связей. В данном случае нечетное количество отрицательных связей свидетельствует об устойчивости когнитивной карты.

Представленные расчеты позволяют сделать вывод, что разработанная система является устойчивой к внешним и внутренним структурным изменениям и может быть использована для моделирования импульсных процессов и сценариев развития.

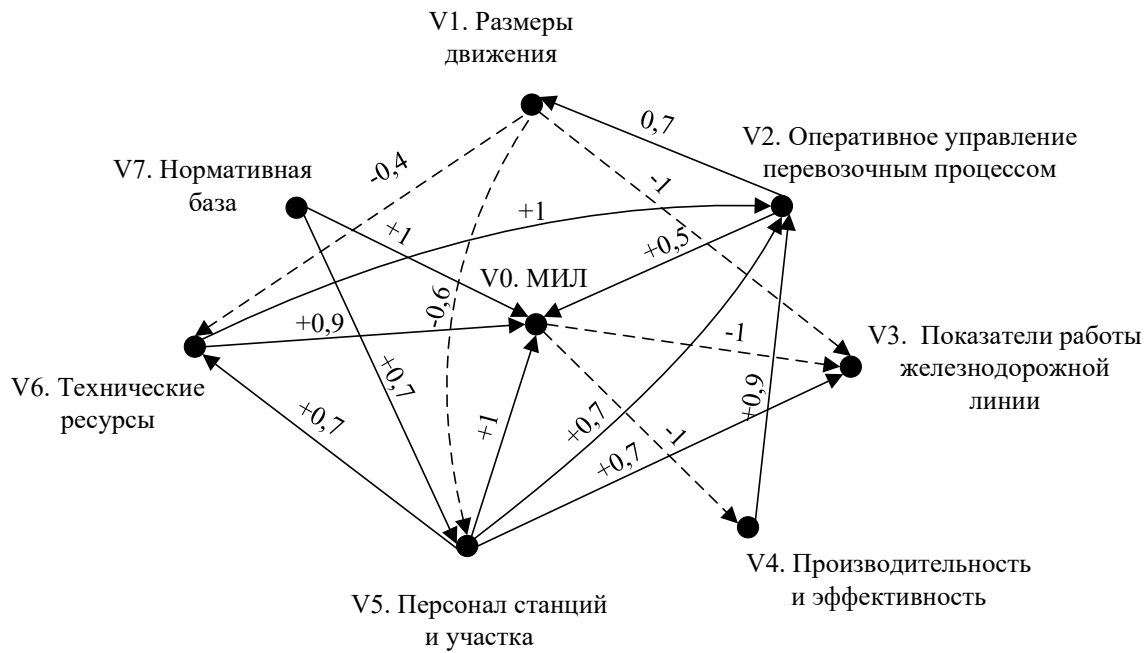


Рис. 4. Укрупненная когнитивная карта функционирования МИЛ

Таблица 1. Показатели когнитивной карты функционирования МИЛ

Названия концептов	Консонанс влияния системы	Диссонанс влияния системы	Консонанс влияния концепта	Диссонанс влияния концепта	Влияние системы на концепт	Влияние концепта на систему
Размеры движения	0,15	0,85	0,28	0,72	0,1	-0,24
Оперативное управление перевозочным процессом	0,28	0,72	0,19	0,81	-0,32	-0,12
Показатели работы железнодорожной линии	0,29	0,71	0,0	1,0	-0,73	0,00
Производительность и эффективность	0,28	0,72	0,19	0,81	-0,53	0,06
Персонал станций и участка	0,15	0,85	0,27	0,73	-0,04	-0,12
Технические ресурсы	0,15	0,85	0,19	0,81	0,10	-0,21
Нормативная база	0,00	1,00	0,33	0,67	0,00	-0,03
Функционирование МИЛ	0,33	0,67	0,19	0,81	0,35	-0,42

3. Показатели когнитивной модели

Для дальнейших расчетов может быть выбрана любая программная среда и язык программирования Node.js [19]. В матрице отражены положительные и отрицательные связи между концептами, которые определены на основе экспертных оценок. Когнитивная карта построена для убыточной МИЛ. Как видно из рис. 1 и табл. 1, наибольшее негативное воздействие оказывает концепт «Размеры движения ниже нормативных». От исходной когнитивной матрицы (A) переходим к когнитивной матрице положительных связей R размерности $2n \cdot 2n$ (где n — число концептов) по следующим

выражениям согласно [20, 21]. Элементы r_{ij} матрицы R (7) определяются из матрицы (A) путем следующей замены:

$$w_{ij} > 0 \rightarrow r_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, r_{2i,2j} = w_{ij}. \tag{5}$$

$$-w'_{ij} > 0 \rightarrow r_{2i-1,2j} = -w'_{ij}, r_{2i,2i-1} = -w'_{ij}. \tag{6}$$

где $w_{ij}; -w'_{ij}$ — основные элементы матрицы, имеющие ненулевое значение; i, j — строка и столбец матрицы.

Остальные элементы матрицы R принимают нулевое значение. В выражении (7) представлен переход к когнитивной матрице R.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & -0,5 & -0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0,7 & 0 & 0,9 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = R. \tag{7}$$

Определено транзитивное замыкание нечеткой матрицы R в соответствии с [18]. Примем, что $R = V_i^\infty = 1^{pl}$. Операция V в данном случае — это взятие покомпонентного максимума. Возведение в степень $R^n = R^{n-1} \cdot R$. Для точности до 0,01 достаточно остановиться на 200 шаге.

В результате транзитивного замыкания матрицы (R) (7) в матрице существуют двойные связи. Такие связи представлены положительно-отрицательной парой $v_{ij}; v'_{ij}$. Построено эвристическое транзитивное замыкание по выражениям (8, 9):

$$v_{ij} = \max\{r_{2i-1,2j-1}, r_{2i2j}\}. \tag{8}$$

$$v'_{ij} = -\max\{r_{2i-1,2j}, r_{2i-1,2j}\}. \tag{9}$$

Фрагмент транзитивно замкнутой матрицы когнитивной карты представлен в выражении (10).

$$\begin{bmatrix} 0,18 & -0,42 & 0,54 & -0,38 & 0,6 & -1 & 0,6 & -0,42 & 0,25 & -0,6 & 0,18 & -0,42 \\ 0 & 0 & 0,2 & -0,45 & 0,23 & -0,5 & 0,23 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9 & -0,41 & 0,2 & 0,45 & 0,2 & -0,45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & -0,29 & 0,63 & -0,9 & 0,7 & -1 & 0,7 & -1 & 0,18 & 0,18 & 0,7 & 0,29 \\ 0 & 0 & 0,36 & -0,81 & 0,41 & -0,9 & 0,41 & -0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Дальнейшее исследование основано на вычислении показателей укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ, основными среди которых являются консонанса, диссонанса и воздействия концептов на систему и системы на концепты [18].

Консонансом влияния i -го концепта на j -й показатель определяется по выражению:

$$c_{ij} = \frac{|v_{ij} + v'_{ij}|}{|v_{ij}| + |v'_{ij}|}. \quad (12)$$

Воздействием i -го концепта на j -й показатель определяется по выражению:

$$p_{ij} > \operatorname{sgn}(v_{ij} + v'_{ij}) \max(|v_{ij}|, |v'_{ij}|), |v_{ij}| \neq |v'_{ij}|. \quad (13)$$

Диссонанс определяется как нечеткое дополнение консонанса по выражению:

$$d_{ij} = 1 - c_{ij}. \quad (14)$$

Таким образом, под воздействием понимается доминирующее по силе влияние между концептами, а показатель консонанса выражает меру доверия к знаку воздействия (чем выше консонанс, тем убедительнее мнение об этом знаке). Наибольший интерес для анализа системы представляют интегральные показатели консонанса и воздействия. Выражения для их вычисления приведены ниже [18].

Консонанс влияния i -го концепта на систему:

$$C_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (15)$$

где c_{ij} — консонанс влияния i -го концепта на j -й показатель.

Консонанс влияния системы на j -й концепт:

$$C_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (16)$$

Для диссонанса определяются аналогичные двойственные показатели:

$$D_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad (17)$$

где d_{ij} — диссонанс влияния i -го концепта на j -й.

Диссонанс влияния системы на j -й концепт:

$$D_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}. \quad (18)$$

Воздействие системы на j -й концепт:

$$P_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}, \quad (19)$$

где p_{ij} — воздействие i -го концепта на j -й.

Воздействие системы на j -й концепт:

$$P_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}. \quad (20)$$

Показатели когнитивной карты функционирования МИЛ на основании выражений (13–20) представлены в табл. 1.

На основании показателей когнитивной карты наибольший консонанс влияния системы оказывают управляемые концепты, к которым относятся: «Оперативное управление перевозочным процессом», «Персонал станций и участка» и «Технические ресурсы».

Положительное влияние на систему среди концептов оказывает только «Производительность и эффективность». Наибольшее отрицательное влияние на систему оказывают концепты: «Размеры движения», «Оперативное управление перевозочным процессом» и «Технические ресурсы». Негативное влияние перечисленных концептов необходимо снизить путем разработки механизмов планирования и стимулирования к перевозкам на МИЛ, через анализ стейкхолдеров перевозочного процесса.

Таким образом, с помощью когнитивного анализа сформулированы концепты, которые в наибольшей степени оказывают влияние на эффективность деятельности МИЛ. Выявлены основные факторы, оказывающие негативное влияние на функционирование МИЛ,

Таблица 2. План модельного эксперимента

Сценарии	Управляющие концепты																									
	V2. Оперативное управление перевозочным процессом							V5. Персонал станций и участка							V6. Технические ресурсы											
	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V7	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7			
1. Поиск грузовой базы			+	•	+	—	*			+	+	+	*			+	+	*								
2. Модернизация			+	+	+	*			+	*											•	+	+			
3. Консервирование			—	—	—	—	+			—	—	—									—	—	*			
4. Закрытие путей			—	—	—	*			—	—	—	—	*								—	—	—	*		
5. Оптимальный вариант			+	+	+			+	•	+	+										•	+				

Примечание: «+» — воздействие ОАО «РЖД»; «-» — негативные тенденции; «*» — воздействие органов власти; «•» — воздействие возможных стейкхолдеров.

к которым относятся: «Низкие размеры движения», «Функциональное управление», «Персонал станций и участка», «Технические ресурсы». Воздействуя на вышеперечисленные факторы, можно значительно улучшить функционирование МИЛ.

4. Импульсное моделирование

Модель когнитивной карты может подвергаться внешним импульсным воздействиям в любой момент времени, функция значения факторов в момент времени $(t + 1)$ будет иметь вид [18]:

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + p_i^0(t + 1) + \sum_{j=1}^n sig(u_j, u_i)p_j(t), \quad (21)$$

где $v_i(t)$ — исходное состояние когнитивной системы;

$p_i^0(t + 1)$ — момент внесения внешнего импульсного воздействия;

$\sum_{j=1}^n sig(u_j, u_i)p_j(t)$ — импульсное воздействие

на концепты u_j , соответствующее обратному значению класса станции u_i и имеющее обратное значение, соответствующее классу линии.

В табл. 2 представлен план модельных экспериментов, который состоит из значений импульсов, вносимых в концепты когнитивной карты функционирования МИЛ.

Наиболее существенные результаты моделирования сценариев развития при внесении

импульсов в концепты укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ представлены на рис. 5–8.

Моделирование осуществляется на основе внесения импульсных воздействий (21) в управляемые концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка», и представлена оценка результатов моделирования. Внесен импульс «+1» в концепт «Функциональное управление» (рис. 5).

При внесении импульса «+1» в концепт «Оперативное управление перевозочным процессом» существенного изменения «Производительности и эффективности» не наблюдается. Внесен импульс «+1» в концепт «Технические ресурсы» (рис. 6).

При внесении импульса «+1» в концепт «Технические ресурсы» существенного изменения «Производительности и эффективности» не наблюдается. Внесен импульс «+1» в концепт «Персонал станций и участка» (рис. 7).

При внесении импульса «+1» в концепт «Персонал станций и участка» наблюдается незначительный рост «Производительности и эффективности», что свидетельствует о возможности повышения эффективности функционирования МИЛ путем положительного импульса на концепт «Персонал станций и участка». Это позволяет сделать вывод о достоверности и адекватности модели, поскольку большинство мероприятий, выполняемых на железной дороге в части функционирования МИЛ, связаны с кадровыми вопросами.

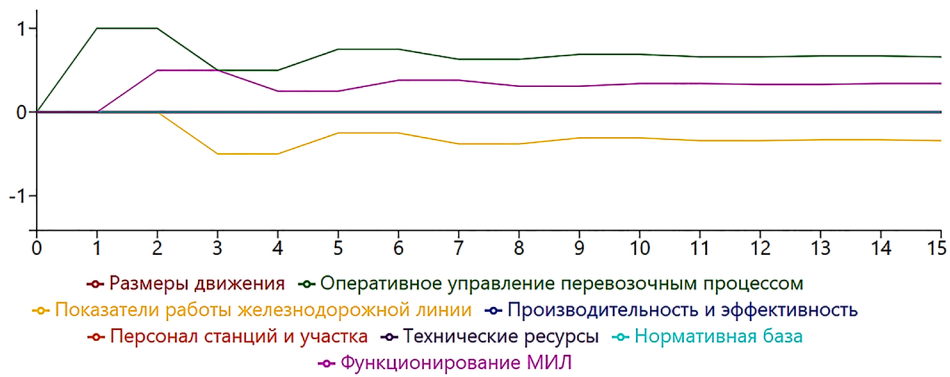


Рис. 5. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Оперативное управление перевозочным процессом»

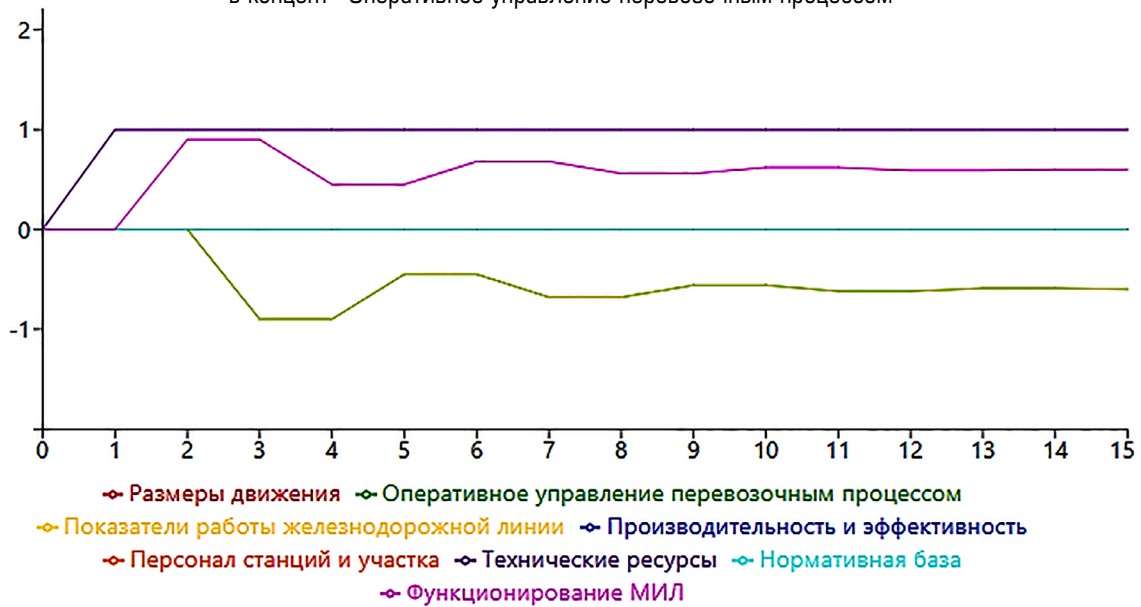


Рис. 6. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Технические ресурсы»

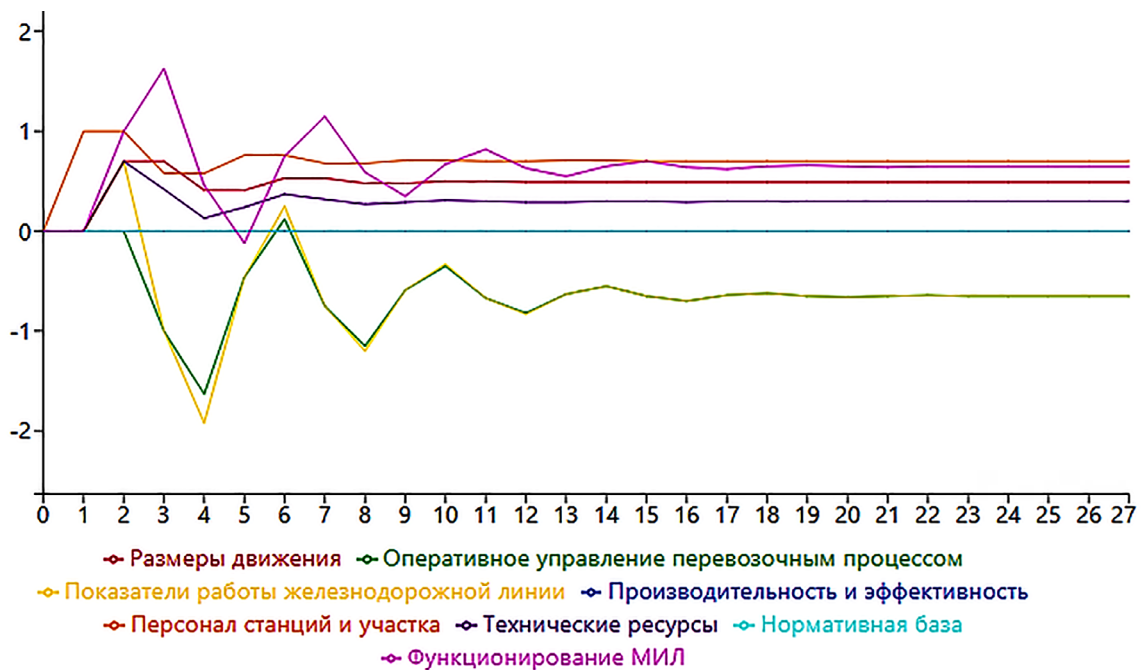


Рис. 7. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Персонал станций и участка»

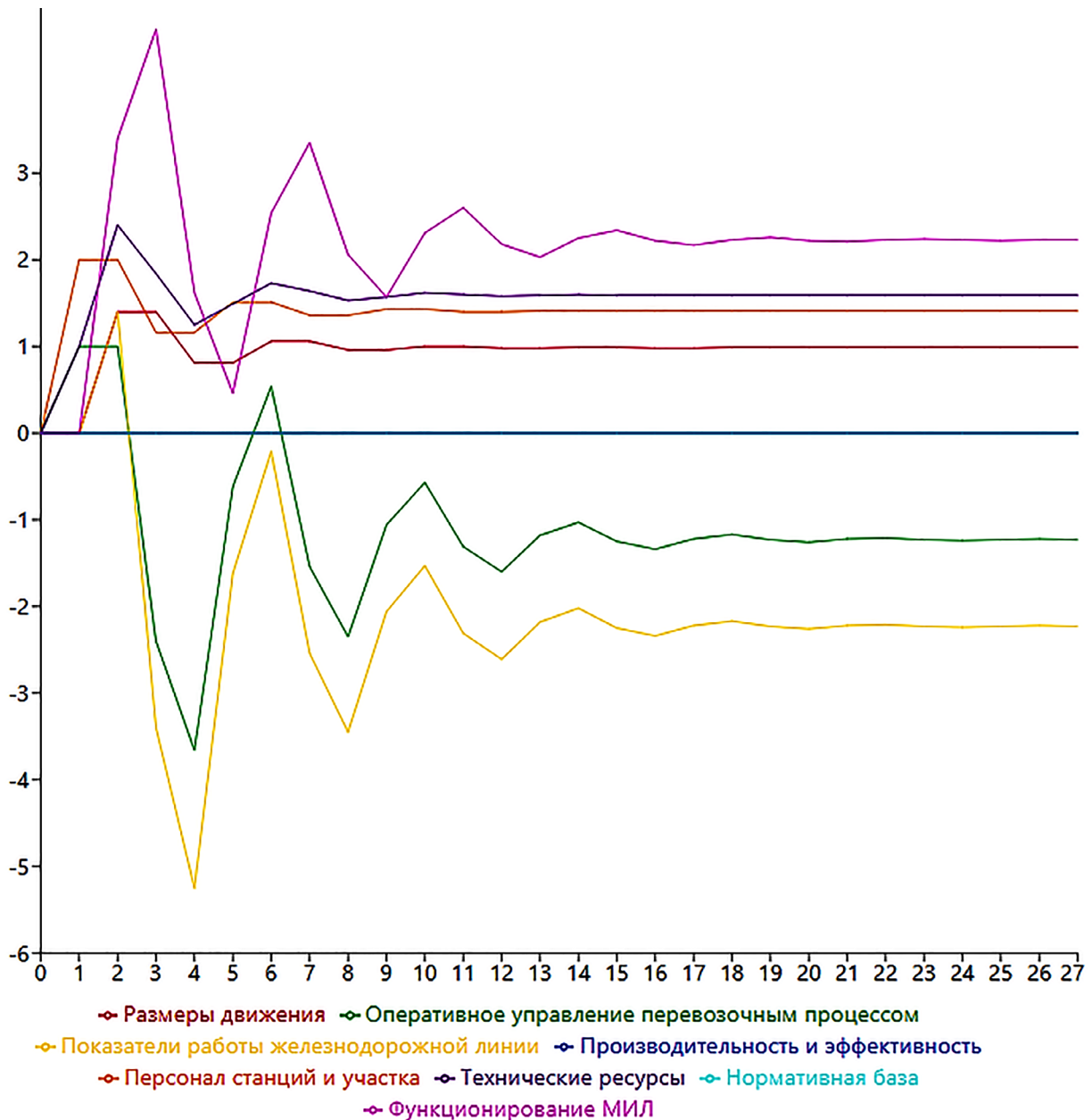


Рис. 8. Внесен импульс в концепты «Функционального управления», «Персонал станций и участка» и «Технические ресурсы»

Внесен импульс во все ранее рассмотренные концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка» (рис. 8).

На основании рис. 8 при внесении импульса, равного «+1», в концепт «Функционального управления» и импульса «+2» в концепт «Персонал станций и участка» рост производительности и эффективности функционирования МИЛ не наблюдается.

Заключение

В статье разработан механизм диагностики эксплуатации МИЛ. Описан процесс функционирования МИЛ, который послужил основой для разработки нечеткой укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ. Дано математическое описание состояния железнодорожного участка, представленное в виде кортежа технических, технологических и экономических показателей. Одним из элементов разработанного механизма является

жизненный цикл функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0. Описан порядок функционирования и переходов этапов жизненного цикла с указанием нормативных документов, применяемых на разных этапах функционирования линии.

Моделирование показало, что наибольший положительный эффект достигается при воздействии на концепт «Персонал станций и участка». Воздействие на другие рассматриваемые концепты и комплексное воздействие на несколько концептов положительного эффекта не дает. На основании анализа результатов моделирования сценариев сделаны следующие утверждения:

1. При оптимистичных сценариях функционирования МИЛ (поиска грузовой базы, модернизации и оптимального варианта функционирования) необходимо увеличение размеров движения до нормативных значений. Этого можно добиться путем привлечения возможных стейкхолдеров перевозочного процесса и предоставлением обоснованных скидок с перевозочного тарифа.

2. Пессимистические сценарии, такие как консервирование и закрытие линии, приводят к негативным тенденциям не только на концепты укрупненной когнитивной карты, связанные с функционированием железной дороги, но также на социальные и экономические возможности территорий, на которых расположен МИЛ.

3. Стабильное функционирование и повышение эффективности функционирования МИЛ возможно при согласованном воздействии на концепты «Оперативного управления перевозочным процессом»; V6 «Технических ресурсов» и «Персонала станций и участка».

4. Отсутствует нормативный (законодательный) механизм стимулирования и поддержки предприятий, которые могут организовывать свои производства рядом с МИЛ для последующей их активной эксплуатации.

5. Размеры движения ниже нормативных негативно влияют на технические ресурсы, персонал станций, участок и показатели работы МИЛ, которые, в свою очередь, негативно влияют на экономические показатели и показатели производительности и эффективности.

Направлением дальнейших исследований повышения эффективности функционирования МИЛ является разработка механизма планирования работы МИЛ на основе состояния технических, технологических и экономических показателей и механизма стимулирования стейкхолдеров перевозочного процесса для интенсификации перевозок на МИЛ. ▲

Библиографический список

1. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодетальных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. — 2014. — № 8. — С. 79–85.
2. Вакуленко С. П. Малодетальные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 3(70). — С. 174–180. — DOI: doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.
3. Никитин А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодетальных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 45–61. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.
4. Frumin D. Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation. — Vol. 28: EPIc Series. EasyChair, 2014. — Pp. 19–35.
5. Chan Y. K. The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey et al. // The TQM Magazine. — 1998. — Vol. 10. — № 6. — Pp. 420–424.
6. Badetskii A. P. Improving the stability of the train formation plan to uneven operational work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // Transportation Research Procedia. Ser. "International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2020". — 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
7. Chudzikiewicz A. Simulation evaluation of the costs of adapting the low density traffic line to practical exploitation / A. Chudzikiewicz // Procedia Social and Behavioral Sciences 20. — 2011. — Pp. 244–250. — DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.08.030.
8. Епишкин И. А. Причины появления малодетальных линий в РФ / И. А. Епишкин, К. В. Фионова // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 262–264.
9. Шарапов С. Н. Повышение эффективности работы малоинтенсивных железнодорожных линий / С. Н. Шарапов, С. В. Горельцев, М. В. Лялько // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 6. — С. 36–46.
10. 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.

11. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодетальных 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.
12. Kovalev K. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models / K. Kovalev, A. Novichikhin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402 LNNS. — С. 701–709. — DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_76.
13. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. — 2021. — P. 032008. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.
14. Кульба В. В. Управление и контроль реализации социально-экономических программ / В. В. Кульба, С. С. Ковалевский. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
15. Новиков Д. А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д. А. Новиков. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. — 150 с.
16. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. — М.: МПСИ, 2005. — 584 с.
17. Армстронг М. Управление результативностью. Система оценки результатов в действии / М. Армстронг. — Альпина Диджитал, 2011. — 276 с.
18. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс; пер. англ. А. М. Раппопорта, С. И. Травкина; под ред. А. И. Теймана. — М.: Наука, 1986. — 496 с.
19. Node.js — программная платформа. — URL: <https://www.node.org/> (дата обращения: 24.08.2022).
20. Управление и контроль реализации социально-экономических целевых программ / Под ред. В. В. Кульбы, С. С. Ковалевского. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
21. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы: Пер. англ. / Касти Дж. — М.: Мир, 1982. — 216 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 72-86
 DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86

Diagnostics Mechanism of Low-Density Railway Lines on the Basis of Fuzzy Cognitive Modeling

Information about authors

Kovalev K. E., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: kovalev_kostia@mail.ru

Novichikhin A. V., Doctor in Engineering, Professor¹. E-mail: novichikhin@bk.ru

Sakovich I. L., PhD in Engineering, Associate Professor¹, First Deputy Head for Economics, Finance and Corporate Coordination². E-mail: logist@pgups.ru

Bolotin V. A., PhD in Engineering, Professor¹. E-mail: spb-vab@yandex.ru

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, "Logistics and Commercial Work" Department, Saint Petersburg

²Oktyabrskaya Railway – branch of JSC "Russian Railways", St. Petersburg

Abstract: For to identify functioning problem of railway lines various mechanisms are used, including the mechanism of low-density railway line exploitation diagnostics which allows to raise their functioning efficiency. The proposed mechanism allows to evaluate low-density railway line current state and to establish cause-and-effect relationships leading to line unprofitability, to give analysis of indicators which to the greatest extent influence negatively the line functioning. Cognitive modeling method is used for this purpose. The article develops enlarged cognitive map of low-density railway line functioning that's used for the diagnostics of line exploitation existing state. Cognitive map consists of concepts, links between concepts and links' weight values. On cognitive map basis, adjacency matrix is made up which allows to evaluate reliability and sustainability of fuzzy cognitive map according to internal and external disturbances. Characteristic equation and matrix eigenvalues are calculated which allow to give the assessment of cognitive map indicators in the form of the influence of concepts on system and of system on concepts.

Fuzzy cognitive map indicators are established, namely, system influence consonance, system influence dissonance, concept influence on system which give the most complete representation of low-density line internal structure. "Technical resources", "stations' and section's staff", "normative base" among concepts touch on the largest positive impact on system. The most significant positive influence on the listed concepts will allow to rise operation efficiency of low-density railway lines. "Traffic volume" concept among concepts causes the most negative influence on the system because of the lack of quantity of train pairs, passing along the line, a day.

The plan of experiments for to define the changes in the parameters of "Productivity and effectiveness" concepts, when exerting impulse influences on "Operational management", "Technical resources" and "Stations' and section's staff" concepts with the purpose of the evaluation of their influence on "Productivity" and "Efficiency" concepts, is made up. When introducing impulses into "Staff" concept, productivity and efficiency growth is observed that testifies to the possibility of efficiency rise of low-density railway line functioning by the way of positive impulse on "Staff" concept.

Keywords: management of transportation processes; low-density lines; diagnostics mechanism for low-density railway line exploitation; cognitive modeling; impulse processes; railway transport.

References

1. Kirilenko O. N. Ekonomicheskaya effektivnost' metodov ekspluatatsii malodeyatel'nykh liniy [Economic efficiency of operating methods for low-capacity lines]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways]. 2014, I. 8, pp. 79–85. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. Malodeyatel'nye linii: sostoyanie i varianty optimizatsii [Inactive lines: state and optimization options]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, vol. 15, I. 3 (70), pp. 174–180. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1. (In Russian)
3. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdru stantsiyami na malodeyatel'nykh liniyakh

- [The possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2019, vol. 5, I. 1, pp. 45–61. (In Russian)
4. Frumin D., Lomazova I. A. Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation. 2014, vol. 28: EPIC Series. EasyChair, pp. 19–35.
 5. Chan Y. K., Gaffney P., Neailey K., Ip W. H. The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management. *The TQM Magazine*. 1998, vol. 10, i. 6, pp. 420–424.
 6. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the stability of the train formation plan to uneven operational work. *Transportation Research Procedia. Ser. "International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2020"*. 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
 7. Chudzikiewicz A. Simulation evaluation of the costs of adapting the low density traffic line to practical exploitation. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20. 2011, pp. 244–250. DOI:10.1016/j.sbspro.2011.08.030.
 8. Epishkin I. A., Fionova K. V. Prichiny poyavleniya malodeyatel'nykh liniy v RF [Reasons for the appearance of low-density lines in the Russian Federation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, I. 6, pp. 262–264. (In Russian)
 9. Sharapov S. N., Gorel'tsev S. V., Lyal'ko M. V. Povyshenie effektivnosti raboty malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Improving the efficiency of low-density railway lines]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport.]. 2018, I. 6, pp. 36–46. (In Russian)
 10. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved' O. A. Razrabotka mekhanizmov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Development of mechanisms for improving the efficiency of low-density 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)
 11. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Integrated synergetic-indicator approach to managing 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)
 12. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 402 LNNS, pp. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.
 13. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines. *Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series* 2131. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.
 14. Kul'ba V. V., Kovalevskiy S. S. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh program* [Management and control of the implementation of socio-economic programs]. Moscow: «LIBROKOM» Publ., 2009. 400 p. (In Russian)
 15. Novikov D. A. *Mekhanizmy funktsionirovaniya mnogourovnevnykh organizatsionnykh sistem* [Functioning mechanisms of multi-level organizational systems]. Moscow: Fond «Problemy upravleniya» Publ., 1999. 150 p. (In Russian)
 16. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI Publ., 2005. 584 p. (In Russian)
 17. Armstrong M. *Upravlenie rezul'tativnost'yu. Sistema otsenki rezul'tatov v deystvii* [Performance management. The system for evaluating results in action]. «Al'pina Didzhital» Publ., 2011. 276 p. (In Russian)
 18. Roberts F. S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham* [Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological and Ecological Problems]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 496 p. (In Russian)
 19. *Node.js — programmnaya platforma* [Node.js is a software platform]. Available at: <https://www.node.org/> (accessed: August 24, 2022).
 20. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh tselevykh program* [Management and control of the implementation of socio-economic target programs]. Moscow: «LIBROKOM» Publ., 2009. 400 p. (In Russian)
 21. Kasti Dzh. *Bol'shie sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy* [Large systems. Connectivity, complexity and catastrophes]. Moscow: Mir Publ., 1982. 216 p. (In Russian)

УДК 656.13

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ В ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

САЛЬНИКОВА Анна Дмитриевна, аспирант; e-mail: salnikova.ad@edu.spbstu.ru

БАНИТЕ Аушра Владовна, ассистент; e-mail: banite_av@spbstu.ru

ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич, канд. техн. наук, доцент; e-mail: plotnikov_dg@spbstu.ru

КАШТАЛИНСКИЙ Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент; e-mail: ask1188@mail.ru

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

В статье представлена методика оптимизации транспортных затрат с применением моделирования в программном пакете PTV Visum. На основании анализа проблем транспорта в крупных городских агломерациях выбран критерий качества для оценки работы пассажирского транспорта. Предложен подход по внедрению системы транспортно-пересадочных узлов с целью минимизации временных затрат на пересадку в частности и поездку на транспорте общего пользования в целом. Данный метод оптимизации транспортных затрат представляет собой алгоритм 3 ключевых блоков: формирование транспортной модели исследуемой агломерации, условия размещения и выбор местоположения транспортно-пересадочных узлов. Модель формируется на основе 4-этапного подхода, распределение поездок в сети базируется на энтропийном подходе, который подробнее рассмотрен во втором разделе. Условия размещения вытекают из идеи минимизировать суммарные временные затраты на перемещение, количество внедряемых узлов ограничивается финансированием их постройки. Применение подхода продемонстрировано на примере северо-западной городской агломерации Сертолово — Осиновая Роща — Парголово, которая представляет собой активно застраиваемые жилые районы на границе г. Санкт-Петербурга. Определены особенности ее транспортной сети, в том числе узлы и магистрали с затрудненным движением. На основе открытых источников и статистических данных разработана транспортная модель, проведена ее калибровка. Представлены 3 варианта размещения транспортно-пересадочных узлов на улично-дорожной сети агломерации. В качестве результата исследования представлен анализ вариантов размещения пересадочных узлов и предложен наиболее перспективный с точки зрения достижения целевого значения вариант их размещения в рассматриваемой агломерации.

Ключевые слова: транспортное планирование; городская агломерация; транспортно-пересадочный узел; улично-дорожная сеть; транспортное моделирование.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98

▼ Введение

Рост плотности населения в крупных городах и масштабная застройка пригородов приводят к формированию жилых районов вдали от центров деловой активности, возрастает потребность в передвижении, а вместе с ней и транспортный спрос [1]. Растущая маятниковая миграция населения выводит транспортную доступность как характеристику уровня жизни человека на первый план, делает ее главным социальным приоритетом развития транспортного комплекса [2]. Этот факт обуславливает необходимость не только решения уже существующих проблем транспортной инфраструктуры, таких как неразвитая сеть пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП), перегруженность автомобильных дорог, но и ее модернизации в

перспективе развития городов и роста численности населения.

Повышение мобильности населения через рост его обеспеченности индивидуальным транспортом не решает проблем, так как влечет за собой возникновение новых: увеличение нагрузки на улично-дорожную сеть, экологические последствия от роста объема выхлопов в атмосферу [3]. Понимание, что подобный путь развития транспортных систем является тупиковым, появилось еще в прошлом веке, но комплексный подход к решению задачи обеспечения мобильности населения стал использоваться сравнительно недавно¹. В дан-

¹ Постановление Правительства РФ от 25 декабря 2015 г. № 1440 «Об утверждении требований к программам комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, городских округов».

ном случае под комплексным подходом стоит понимать всестороннее развитие транспортной инфраструктуры, систем как индивидуального, так и общественного транспорта, а также стратегию развития системы в целом — транспортное планирование.

Транспортное планирование не только решает широкий спектр вопросов и проблем, но и обеспечивает устойчивость транспортной системы. Ввиду вариативности сценариев ее функционирования оценка сети возможна только при определении целевых показателей, по которым производится выбор решения. В совокупности с потребностью в обработке больших массивов данных становится необходимым применение моделирования как наиболее удобного инструмента для анализа и принятия планировочных решений². Возможность оперативно просчитывать и анализировать различные сценарии, которую дают современные программы моделирования, является ключевой, когда речь идет о планировании транспортных сетей в агломерациях с быстрым ростом населения.

Целью данного исследования является выработка методического подхода к повышению транспортной мобильности населения путем снижения транспортных затрат через внедрение транспортно-пересадочных узлов (ТПУ). Отметим, что внедрение пересадочных узлов эффективно только тогда, когда их расположение согласуется с ключевыми пассажиропотоками. Задача данного исследования: смоделировать в PTV Visum транспортные потоки исследуемой агломерации и провести сравнительный анализ транспортных затрат при различных вариантах размещения пересадочных узлов в дорожной сети.

1. Выбор критерия качества для работы ПТОП

Исходя из анализа транспортных проблем городов [4–7] и необходимости обеспечения транспортной устойчивости [8] можно сделать вывод о необходимости повышения качества транспортного обслуживания населения. Оно

² Приказ Министерства транспорта РФ от 30 июля 2020 г. № 274 «Об утверждении Правил подготовки документации по организации дорожного движения» (с изменениями и дополнениями).

может осуществляться за счет модернизации и расширения подвижного состава, внедрения объектов транспортной инфраструктуры [9], обеспечения их безопасности [10], создания специальных условий для маломобильных групп граждан [11, 12], пересмотра маршрутов ПТОП для повышения доступности и мобильности населения и снижения транспортных затрат [6, 13]. Последнего можно добиться через внедрение пересадочных тарифов или удобных систем оплаты проезда [14], а также за счет сокращения времени, затрачиваемого на поездку [9].

Как было отмечено выше, время в пересчете на преодолеваемое расстояние является одним из главных критериев, по которым можно оценить качество транспортного обслуживания. Следовательно, при модернизации существующей или проектировании новой транспортной сети необходимо делать упор на сокращение временных затрат при перемещении на ПТОП. Такой подход может способствовать не только приросту пассажиров и снижению автомобилепользования, но и при совокупном улучшении других качественных показателей [9] приведет к росту популярности общественного транспорта.

По информации на 2015 год, временные затраты на базовые перемещения в Санкт-Петербурге составляли более часа. В табл. 1 представлены показатели транспортных корреспонденций для личного транспорта (ЛТ) и ПТОП³.

При этом пределы комфортного времени в пути в одну сторону для поездки с трудовыми целями (наиболее распространенный вид корреспонденций) составляют не более 50 минут для 8-часового рабочего дня. Далее, на рис. 1, представлено сравнение времени корреспонденций для крупнейших в мире городов и агломераций.

Таблица 1. Показатели затрат для ЛТ и ПТОП

Показатель	ЛТ	ПТОП
Средняя длина корреспонденции, км	15,7	16,1
Среднее время поездки, мин. (в границах города)	75 мин (64 мин)	65 мин (54 мин)
Средняя скорость поездки, км/ч	12,6	14,3

³ Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017–2038 г. (перспектива до 2048 г.). — URL: https://krti.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2017/03/22/Презентация_материалов_КТС.pdf (дата обращения: 18.12.2022).

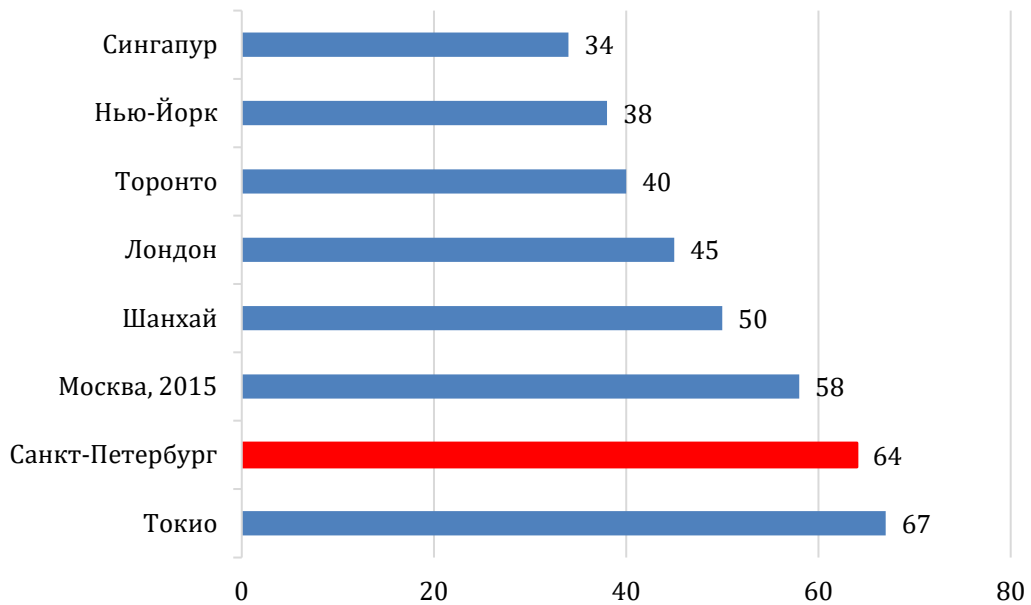


Рис. 1. Среднее время в пути с трудовыми целями в мегаполисах

Как видно из диаграммы, даже в московской агломерации — самой крупной в России — время трудовых корреспонденций ниже, чем в Санкт-Петербурге, и всего на 16 % превышает предельное значение комфортного времени в пути. В Санкт-Петербурге же этот показатель превышен на 28 %.

Исходя из проведенного выше анализа, длительность транспортной корреспонденции с трудовой целью выступает объективным критерием оценки транспортных затрат. Ее целевое значение определено как разность планового значения для 2023 г. по комплексной схеме организации дорожного движения⁴ (составляет 55 минут) и временных затрат на перемещение от станции метро периферийного района к станциям метро делового центра города (составляет в среднем 20 минут). Оно стремится к значению 35 минут.

2. Методика оптимизации транспортных затрат

В данной методике предполагается добиться сокращения транспортных затрат путем перераспределения поездок в системе через внедрение в нее новых объектов — ТПУ.

⁴ Комплексная схема организации дорожного движения Санкт-Петербурга. — URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/11/29/13/КСОДД_Санкт-Петербурга.pdf (дата обращения: 24.12.2022).

В основе распределения поездок лежит энтропийный подход, уже доказавший свою эффективность в практике петербургской (ленинградской) школы транспортного моделирования [15]. Целевая функция формулируется как:

$$\text{Max } f(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!}, \quad (1)$$

где T_{ij} — число поездок из района i в район j .
Ограничения [16]:

$$\sum_j T_{ij} = P_i; \quad (2)$$

$$\sum_i T_{ij} = A_j; \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j T_{ij} \cdot c_{ij} = C, \quad (4)$$

где P_i — общее число отправок из района;
 A_j — общее число прибытий в район;
 c_{ij} — обобщенные затраты на поездку;
 C — общие расходы на поездки в системе.
Заменим натуральным логарифмом в (1):

$$\text{Max} \left(\ln \left(f(T_{ij}) \right) \right) = \text{Max} \left(\ln(T!) - \sum_{ij} \ln(T_{ij}!) \right). \quad (5)$$

Тогда, используя метод множителей Лагранжа:

$$\ln(T!) - \sum_{ij} \ln(T_{ij}!) + \sum_i \lambda_i \cdot \left(P_i - \sum_j T_{ij} \right) + \sum_j \lambda_j \cdot \left(A_j - \sum_i T_{ij} \right) + \beta \cdot \left(C - \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot c_{ij} \right). \quad (6)$$

Взяв первые частные производные по T_{ij} и приравняв их к 0, получим:

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}} = -\ln(T_{ij}) - \lambda_i - \lambda_j - \beta \cdot c_{ij} = 0, \quad (7)$$

где L — лагранжиан;

$\lambda_i, \lambda_j, \beta$ — множители Лагранжа.

Из (7):

$$T_{ij} = e^{-\lambda_i} \cdot e^{-\lambda_j} \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}. \quad (8)$$

Подставим (8) в (2) и (3):

$$e^{-\lambda_i} \sum_j e^{-\lambda_j} \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}} = P_i \Rightarrow e^{-\lambda_i} = \frac{1}{\sum_j e^{-\lambda_j - \beta \cdot c_{ij}}} \cdot P_i. \quad (9)$$

$$e^{-\lambda_j} \sum_i e^{-\lambda_i} \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}} = A_j \Rightarrow e^{-\lambda_j} = \frac{1}{\sum_i e^{-\lambda_i - \beta \cdot c_{ij}}} \cdot A_j. \quad (10)$$

И заменим дроби коэффициентами a_i и b_j соответственно. Получим:

$$T_{ij} = a_i \cdot P_i \cdot b_j \cdot A_j \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}. \quad (11)$$

При решении подобной оптимизационной задачи требуется рассматривать широкую вариацию маршрутов, их комбинирование с учетом задержки на пересадки и согласованность маршрутного расписания в целом. Сделать это вручную даже для сравнительно малых городов со слабо развитой маршрутной сетью довольно затруднительно. Но, когда речь заходит о городской агломерации, подобная задача становится невыполнимой без применения специального программного обеспечения. Для моделирования используются различные программные пакеты, например PTV Vision Traffic, ЕММЕ/2. Они позволяют получать информацию о сложных взаимозависимостях в пределах одной или нескольких систем транспорта, что и позволяет создавать оптимальную

транспортную модель. В данной методике расчеты производятся в PTV Visum с применением стандартной 4-ступенчатой модели⁵.

Предварительно производится анализ мобильности граждан на основе статистических данных и формируется цифровой двойник транспортной сети исследуемой агломерации (на основании данных из открытых геоинформационных систем).

Моделирование производится итерационно с изменением способов размещения пересадочных узлов в сети и коэффициентов (8) при расчете. Для каждой итерации производится оценка матриц затрат с точки зрения достижения целевого значения. Отметим, что время пересадки в узле не должно превышать 5 минут⁶. Чтобы выполнить данное условие, в модели ТПУ задаются как остановки с временем перехода 0 минут и временем ожидания транспорта для пересадки 5 минут. На рис. 2 представлен алгоритм тестирования сценариев размещения.

В таблице, представленной в алгоритме, Ж/д — это железнодорожная станция, М — станция метрополитена, Авт + Тр — остановки автобусов и троллейбусов, Трам — трамвайные остановки. В ней предложены варианты пересечения маршрутов ПТОП в узле для размещения ТПУ. Отметим, что при определении местоположения ТПУ в узле может находиться сразу несколько вариантов пересечения, но не менее одного, предложенного в таблице алгоритма. Например, «М/Авт + Тр» и «Трам/М» одновременно.

Ограничение по количеству ТПУ в системе обусловлено финансовыми затратами на их строительство. Приоритет размещения ТПУ рекомендуется отдавать железнодорожным станциям и станциям метрополитена, так их подвижные составы обладают сравнительно большей вместимостью, чем у иных видов ПТОП, а их расписание более стабильно и предсказуемо в сравнении с наземным городским транспортом, что делает данные транспортные узлы зоной притяжения крупных пассажиропотоков.

⁵ PTV Visum 18. Руководство пользователя. — PTV GROUP, 2018. — 3669 с.

⁶ СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01—89 (утв. Приказом Минстроя России от 30 декабря 2016 г. № 1034/пр) (ред. от 19 декабря 2019 г.).

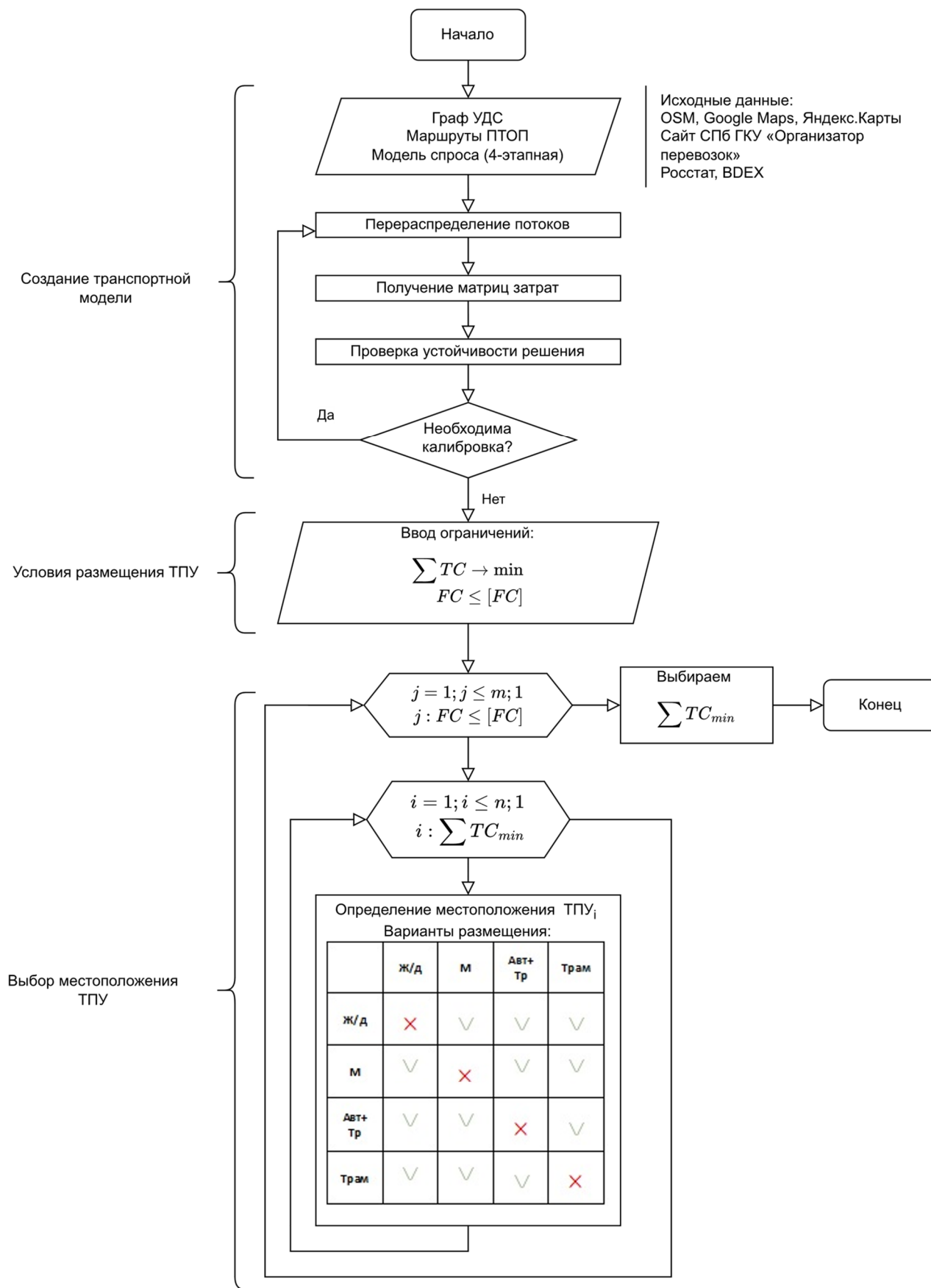


Рис. 2. Алгоритм тестирования сценариев интеграции ТПУ в транспортную сеть:
УДС — улично-дорожная сеть, TC и FC — временные и финансовые затраты соответственно

3. Применение методики на примере агломерации Сертолово — Осиновая Роцца — Парголово

Предварительно была сформирована модель транспортной сети северо-западной агломерации Санкт-Петербурга. Для анализа мобильности населения были отобраны следующие районы:

- 1) п. Парголово (административно входит в состав Выборгского р-на);
- 2) тер. Осиновая Роцца (административно входит в состав п. Парголово);
- 3) муниципальный округ (МО) Светлановское — муниципальный округ Выборгского р-на (не включая п. Парголово);
- 4) МО Шувалово-Озерки — муниципальный округ Выборгского р-на;
- 5) г. Сертолово Ленинградской области.

В модели административные границы этих населенных пунктов приняты как границы транспортных районов.

Основными транспортными артериями, связующими данные районы, являются Выборгское шоссе для автотранспорта и Выборгское направление железной дороги для поездов пригородного сообщения. Помимо этого, в Выборгском р-не есть доступ к синей линии метрополитена — станциям метро Парнас, Проспект Просвещения, Озерки и Удельная.

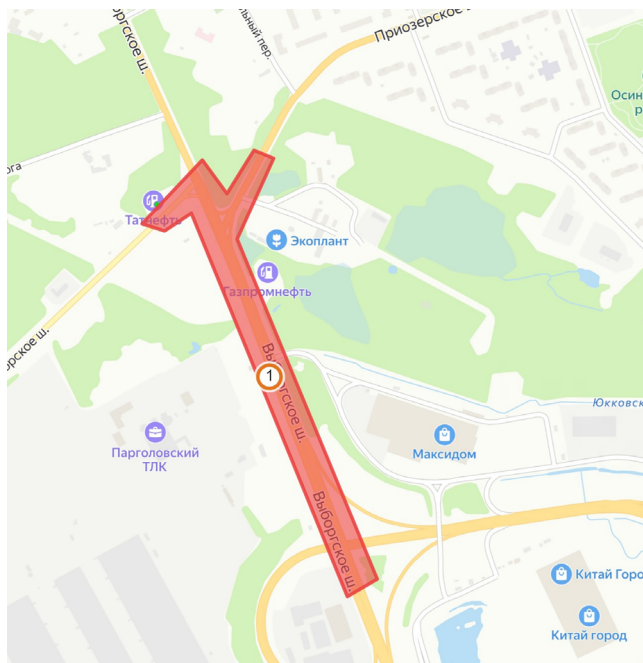


Рис. 3. Зона затрудненного движения: 1 — развилка

Выборгское шоссе в настоящий момент является загруженной магистралью, особенно на интервале от развилки до съезда на Суздальское шоссе. Ежедневно в часы пик образуются заторы, особенно в зонах примыканий, где часто возникают ДТП. Наиболее распространены столкновения на съезде с Суздальского шоссе в направлении области, на примыкании Вокзальной улицы (ДТП может спровоцировать затор в оба направления), на развилке (примыкание Кольцевой автодороги и Приозерского шоссе), реже — на примыкании дороги на Каменку. На рис. 3 и 4 отмечены зоны, в которых наиболее часто образуются заторы.

Численность населения районов, информация о количестве трудящихся получена на основе данных Росстата и Петростата, а также информационного агрегатора VDEX. Распределение жителей по возрастам, типу занятости в каждом муниципальном образовании принято пропорционально общему числу жителей в каждой возрастной группе для Санкт-Петербурга (или Ленинградской области при расчете г. Сертолово) в целом:

$$C_{ab} = \frac{N_b \cdot n_{aСПб}}{N_{СПб}}, \quad (12)$$

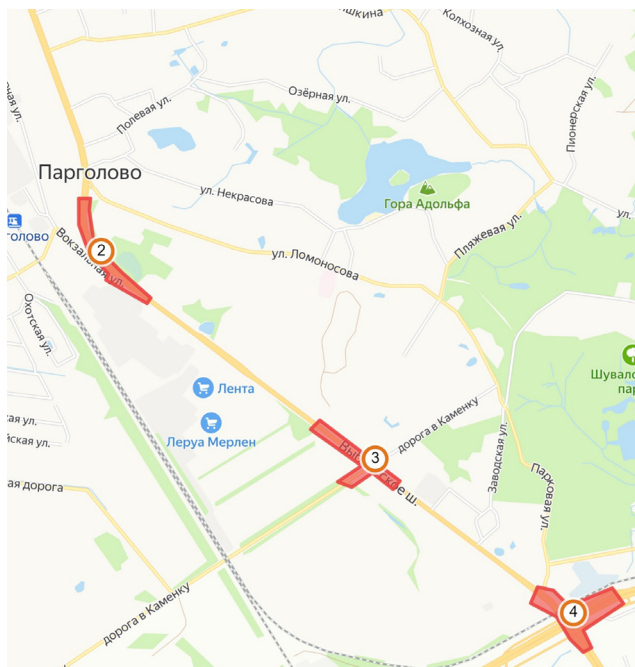


Рис. 4. Зоны затрудненного движения на Выборгском шоссе: 2 — примыкание ул. Вокзальной; 3 — примыкание дороги на Каменку; 4 — съезд с ш. Суздальского

Таблица 2. Матрица временных затрат ПТОП

5 × 5			1	2	3	4	5
	Имя		п. Парголово	Осиновая Роща	МО Светлановское	МО Шувалово-Озерки	г. Сертолово
1	п. Парголово	165,75	0,00	24,71	81,68	33,49	25,87
2	Осиновая Роща	193,84	25,38	0,00	91,26	42,38	34,82
3	МО Светлановское	302,65	70,71	76,65	0,00	73,88	81,40
4	МО Шувалово-Озерки	194,43	35,05	41,51	74,35	0,00	43,52
5	г. Сертолово	181,15	26,36	33,16	80,46	41,17	0,00
	Сумма		157,49	176,03	327,75	190,93	185,61

где C_{ab} — количество жителей a -й социальной группы в b -м муниципальном округе;
 N_b — количество жителей в b -м муниципальном округе;
 $n_{aСПб}$ — количество жителей a -й социальной группы в Санкт-Петербурге;
 $N_{СПб}$ — количество жителей в Санкт-Петербурге.

Аналогично получено количество учащихся, число рабочих мест и т. д. для обозначенных выше муниципальных округов (МО), исходя из значений показателей для г. Санкт-Петербурга или Ленинградской области.

На основе статистических данных разработаны слои спроса, отражающие наиболее распространенные для жителей типы корреспонденций. Они содержат корреспонденции с трудовыми и бытовыми целями для различных групп населения. Каждому слою присвоен соответствующий сегмент спроса — в данной модели сегмент C для ЛТ и сегмент X для ПТОП. В RTV Visum сегменты спроса можно увидеть во вкладке Список (Сегменты спроса). Для каждого сегмента спроса рассчитаны матрицы затрат. Так как критерием оптимизации определено время поездки на общественном транспорте, то для расчета выбраны все матрицы, связанные с временными затратами: время поездки, ожидания транспорта и пешеходных переходов для общественного транспорта.

Для удобства сравнения из указанных выше матриц сформирована суммарная матрица временных затрат. Как видно из табл. 2, в матрице представлены суммарные показатели по временным затратам между каждой моделируемой парой: район — источник, район — цель. Данная матрица отражает текущую транспортную

ситуацию и является референсной. Для каждого варианта размещения ТПУ рассчитана аналогичная матрица и произведено сравнение на предмет достижения целевого значения.

В исследовании было проведено сравнение 3 вариантов размещения транспортных узлов.

Первый вариант базируется на идее размещения ТПУ в соответствии с программой развития транспортной системы Санкт-Петербурга⁷. Из 61 узла, указанного в программе, 4 будут построены в пределах моделируемых районов, на рис. 5 представлена схема их размещения.

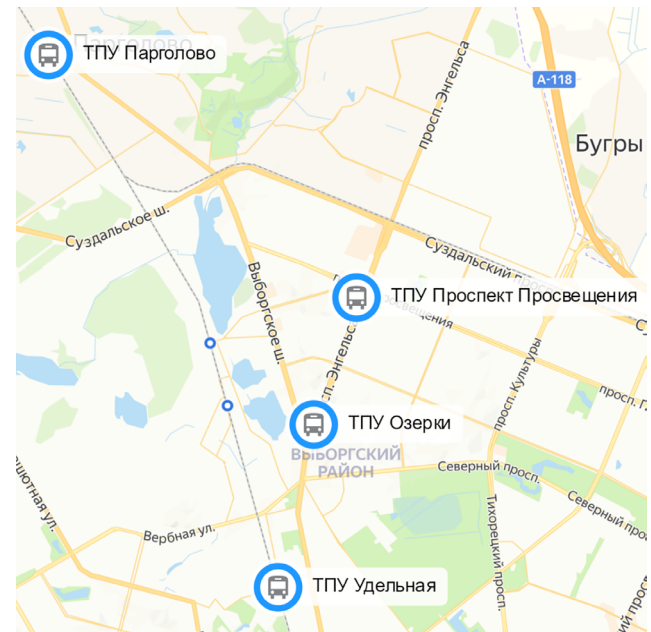


Рис. 5. Первый вариант размещения ТПУ

⁷ О государственной программе Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга»: Постановление правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 г. № 552 (ред. от 16 февраля 2022 г.) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/822403631> (дата обращения: 07.11.2022).

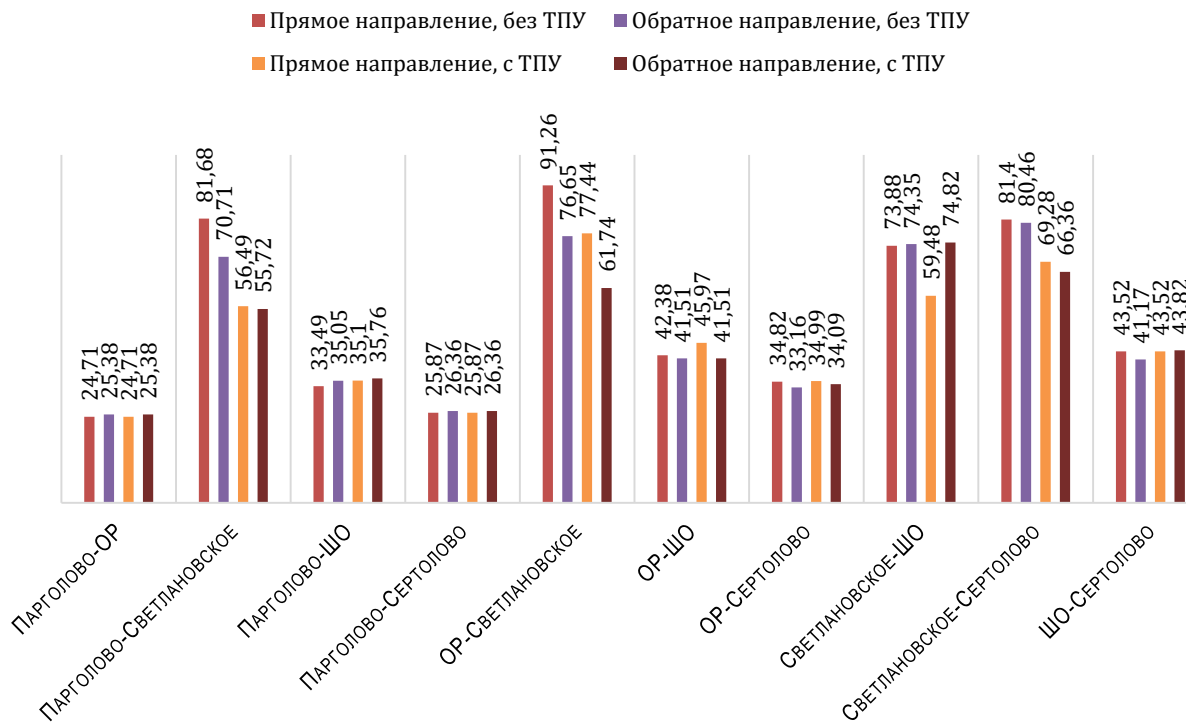


Рис. 6. Изменения времени перемещения между транспортными районами для 1 сценария

На рис. 6 представлено сравнение значений референсной матрицы и полученной после добавления ТПУ в транспортную модель. На данной и последующих диаграммах используются следующие сокращения: ОР — Осиновая Роща, ШО — МО Шувалово-Озерки.

Как видно из диаграммы, внедрение данной схемы ТПУ позволило почти на четверть сократить время перемещения из г. Сертолово в МО Светлановское и в обратную сторону, также на 30 % уменьшилось время перемещения в МО Светлановское из Парголово и на 20 % в обратную сторону, также приблизительно на 20 % сократилось время перемещения из МО Светлановское в Осиновую Рощу, в обратном направлении корреспонденция уменьшилась чуть менее заметно — на 15 %. Время перемещения между некоторыми районами, находящимися в непосредственной близости друг от друга, возросло. Вероятно, к таким результатам привело размещение ТПУ на базе железнодорожных станций в МО Светлановское и п. Парголово.

В связи с чем второй вариант сконцентрирован на идее размещения ТПУ на остановках поездов пригородного сообщения. Базой для размещения пересадочных узлов выступили железнодорожные станции Левашово, Парголово, Озерки, Удельная. Станция Шувалово

не была учтена, поскольку не имеет поблизости остановок ПТОП для осуществления пересадки. Второй вариант размещения представлен на рис. 7.

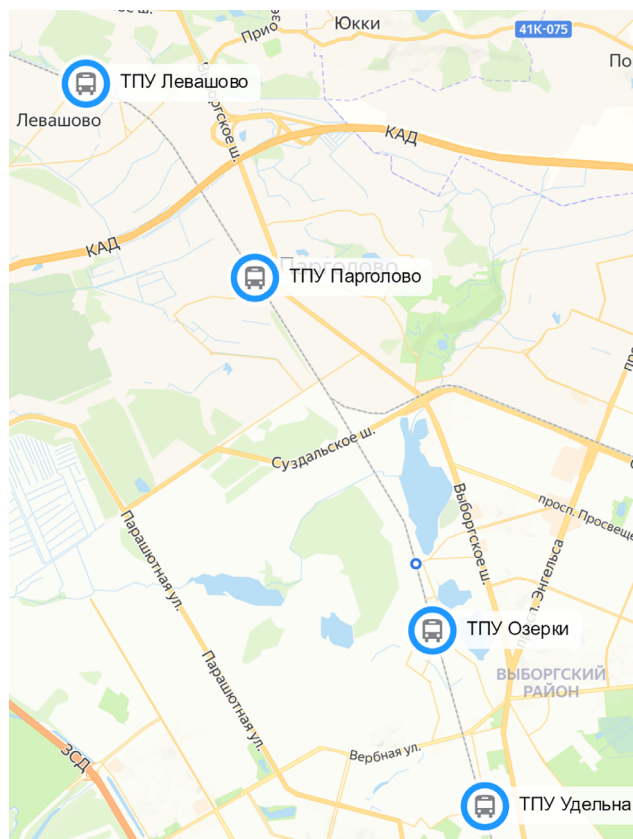


Рис. 7. Второй вариант размещения ТПУ

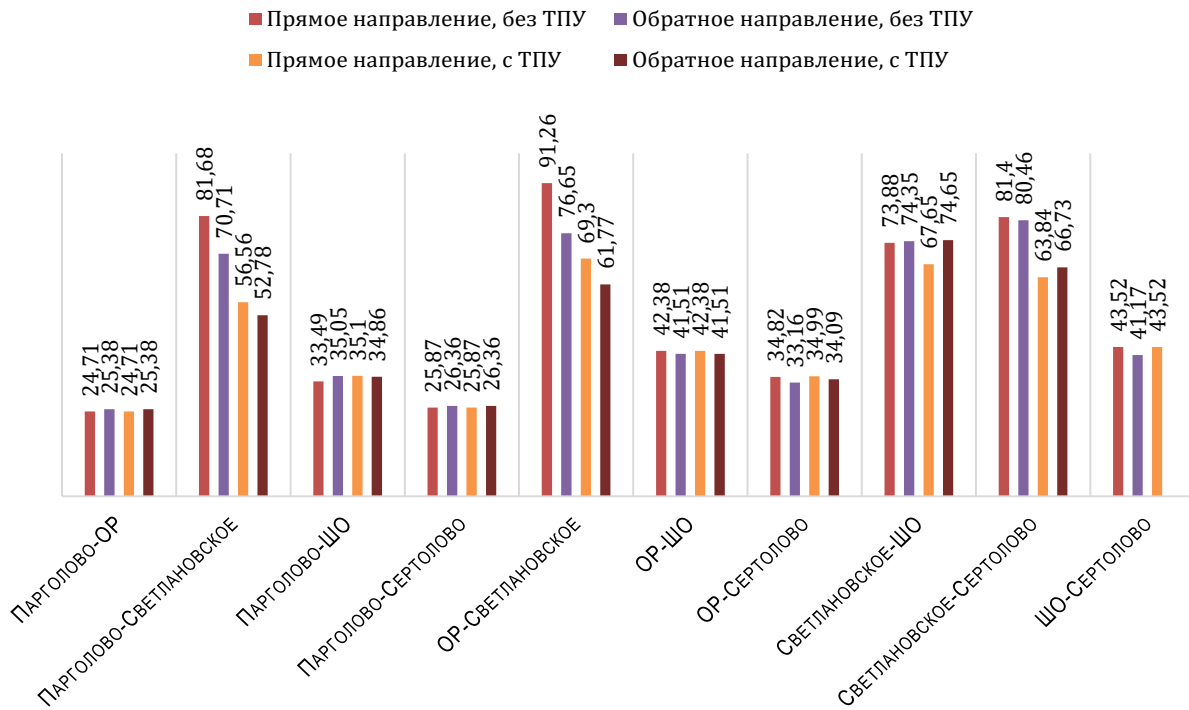


Рис. 8. Изменения времени перемещения между транспортными районами при втором варианте размещения ТПУ

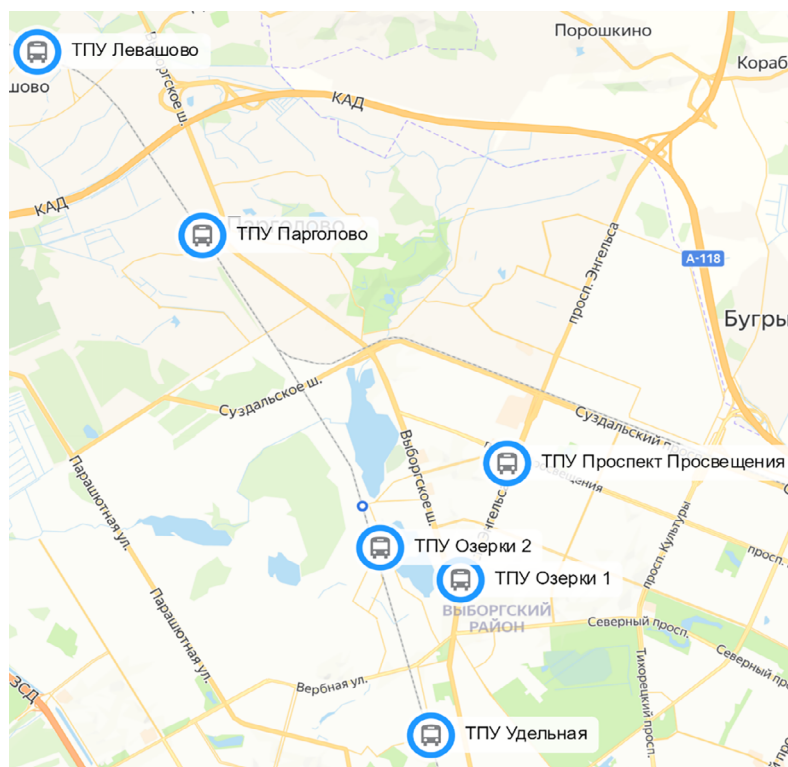


Рис. 9. Третий вариант размещения ТПУ

На рис. 8 представлена диаграмма сравнения референсных значений с полученными при моделировании второго варианта размещения.

Удалось добиться незначительных улучшений — на несколько минут по сравнению с предыдущим вариантом размещения, при

этом ситуация с корреспонденциями в МО Шувалово-Озерки стала хуже, приблизившись суммарно к исходной модели.

В третьем варианте размещения проверим гипотезу о необходимости сохранения ТПУ у станций метро Проспект Просвещения и

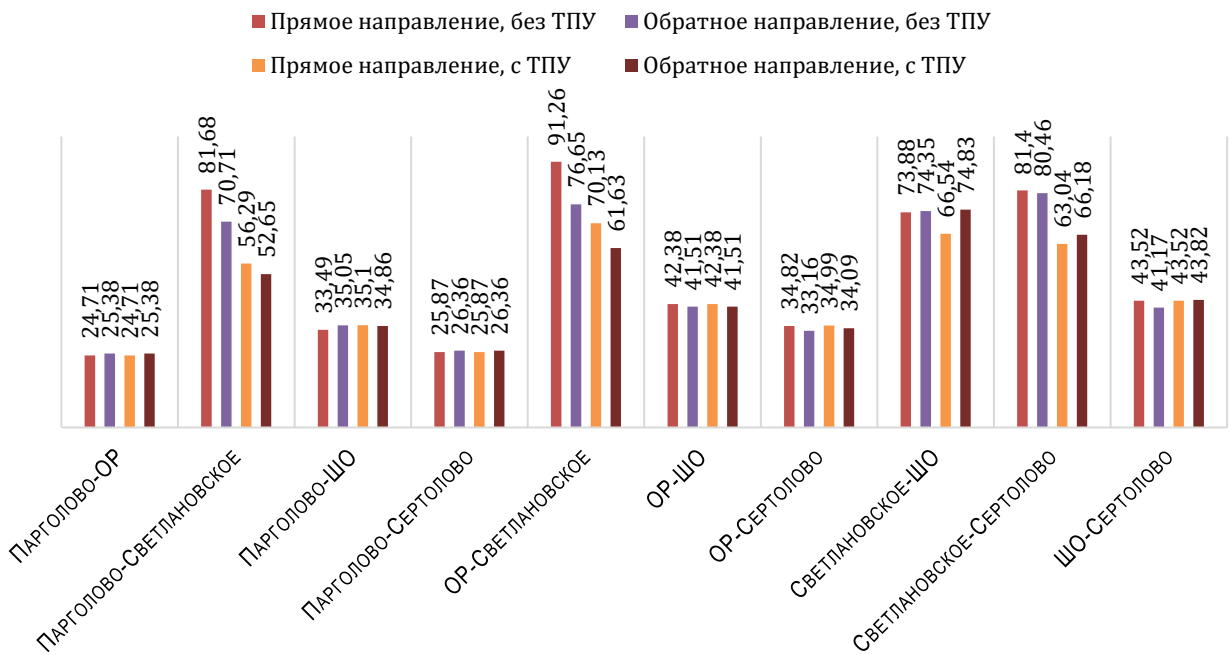


Рис. 10. Изменения времени перемещения между транспортными районами при третьем варианте размещения ТПУ

Озерки, добавив их ко второй схеме размещения. При этом свяжем ТПУ на ж/д станции Озерки с ТПУ на станции метро Озерки, формально он будет считаться единым узлом. Схема размещения представлена на рис. 9.

На рис. 10 представлена диаграмма сравнения референсных значений с полученными при моделировании третьего варианта размещения.

Удалось добиться суммарного снижения транспортных затрат по сравнению с предыдущими вариантами размещения ТПУ, что делает данный вариант размещения наиболее оптимальным.

Заключение

Данная статья была посвящена анализу проблем транспортного планирования в городских агломерациях и применению методик, включающих автоматизированные способы решения транспортных задач.

Разработан алгоритм для выбора местоположения ТПУ в транспортной сети городской агломерации. Алгоритм был применен на модели агломерации Сертолово — Осинвая Роща — Парголово. В рамках исследования было произведено сравнение трех вариантов размещения пересадочных узлов в транспортной сети и предложена наиболее эффективная схема их размещения с точки зрения достижения

целевого показателя — наименьших временных затрат на поездку в ПТОП.

В целом методика оптимизации транспортных затрат показала свою эффективность. С внедрением пересадочных узлов в систему удалось добиться существенного — 20 % и более — снижения длительности транспортных корреспонденций. Наибольшую эффективность показало внедрение ТПУ в зоны мультимодальных пересадок с высокой интенсивностью пассажиропотока: узлы наземный транспорт/метро и наземный транспорт/железная дорога.

Целевого значения удалось добиться только по одной паре районов — п. Парголово в сообщении с МО Шувалово-Озерки. Это связано с особенностями транспортной сети самой агломерации, в которой перемещение между периферийными районами при любом варианте размещения ТПУ завязано на наземном транспорте по единственной магистрали — Выборгскому шоссе вплоть до п. Парголово. Это, в свою очередь, вызывает перегрузку магистрали, которая в своей текущей конфигурации не способна справляться с резко возрастающим в часы пик трафиком. Возникающие заторы снижают среднюю скорость движения ПТОП и нарушают график его работы, что влечет за собой увеличение временных затрат на поездку. ▲

Библиографический список

1. Сакульева Т. Н. Транспортный спрос как функция состояния транспортной сети / Т. Н. Сакульева // Управление. — 2019. — Т. 7. — № 3. — С. 47–53. — DOI: 10.26425/2309-3633-2019-3-47-53.
2. Сибирко И. В. Мобильность населения как социальный приоритет государственной транспортной политики и фактор повышения качества жизни населения России / И. В. Сибирко, Е. А. Степушина // Проблемы и перспективы экономики и управления: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2018 г.). — СПб.: Свое издательство, 2018. — С. 5–10.
3. Goel P. Understanding transport users' preferences for adopting electric vehicle based mobility for sustainable city: A moderated moderated-mediation model / P. Goel, A. Kumar, S. Parayitam et al. // Journal of Transport Geography. — 2023. — № 106.
4. Плотников Д. Г. Применение коротких кольцевых маршрутов для оптимизации транспортной сети района / Д. Г. Плотников, Д. Р. Стахин, А. В. Баните // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: материалы юбилейной Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, 2020. — СПб.: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2020. — Т. 2. — С. 41–45.
5. Глушенкова Е. Д. Анализ методического обеспечения качества транспортного обслуживания населения / Е. Д. Глушенкова, Л. Н. Клепцова // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: материалы III Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 5–6 декабря 2019 года / Отв. ред. Э. И. Забнева. — Новокузнецк: Зебра, 2019. — С. 37–41.
6. Караблин О. В. Об особенностях формирования транспортной системы и транспортного спроса Ростовской агломерации / О. В. Караблин // Бюллетень транспортной информации. — 2021. — № 9(315). — С. 38–44.
7. Плотников Д. Г. Подход к оптимизации структуры системы управления транспортными потоками / Д. Г. Плотников, А. В. Баните, Д. Р. Стахин // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: материалы юбилейной Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 года. СПб.: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2020. — С. 45–48.
8. Lindkvist H. How sustainable are urban transport services? A comparison of MaaS and UCC / H. Lindkvist, L. Melander // Research in Transportation Business & Management. — 2022. — № 43.
9. Савенкова Т. И. Возможности повышения качества транспортного обслуживания населения Санкт-Петербурга / Т. И. Савенкова // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 3(21). — С. 29–44.
10. Borbás P. D. The Importance of the Quality of Urban Public Transport and a Methodological Example for Weighting the Typical Quality Criteria / P. D. Borbás // Regionalnaya ekonomika. Yug Rossii. — 2022. — С. 89–96.
11. Odame P. K. State of public transport services to Ghana's disability population: Lessons from public transport operators in the Accra Metropolitan Assembly / P. K. Odame, E. F. Sam, R. O. Amoako-Sakyi et al. // Social Sciences & Humanities Open. — 2023. — № 7(1).
12. Durand A. Public transport as travel alternative for users of Special Transport Services in the Netherlands / A. Durand, T. Zijlstra // Journal of Transport & Health. — 2023. — № 29.
13. Zhou T. Exploring the determinants of public transport usage and shared mobilities: A case study from Nanchang, China / T. Zhou, J. Zhang, L. Peng et al. // Sustainable Cities and Society. — 2022. — № 87.
14. Калиберда Е. А. Сравнительный анализ систем оплаты проезда общественного транспорта / Е. А. Калиберда, И. В. Федотова, В. В. Нестеров // International Journal of Advanced Studies. — 2019. — Т. 9. — № 1–2. — С. 38–44.
15. Лосин Л. А. Исследование влияния стоимости проезда на транспортный спрос методом математического моделирования / Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 2. — С. 179–194.
16. Nes van R. Lecture 2.2. Trip Distribution / R. van Nes. — URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/2.2-Trip-distribution.pdf> (accessed: December 25, 2022).

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 87–98
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98

Formation of Transport Hub System in Urban Agglomeration

Information about authors

Salnikova A. D., Postgraduate Student.

E-mail: salnikova.ad@edu.spbstu.ru

Banite A. V., Assistant. E-mail: banite_av@spbstu.ru

Plotnikov D. G., PhD in Engineering, Associate Professor.

E-mail: plotnikov_dg@spbstu.ru

Kashtalinsky A. S., PhD in Engineering, Associate Professor.

E-mail: ask1188@mail.ru

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

Abstract: The article presents a methodology for optimizing transport costs with the use of modeling in PTV Visum software package. Based on the analysis of transport problems in large urban agglomerations, a quality criterion was chosen for the assessment of passenger transport performance. An approach has been proposed to introduce transport hub systems with the purpose to minimize time spending on transfer, in particular, and on trip by public transport in a whole. This optimization method for transport spending represents an algorithm of 3 key blocks: the formation of transport model for being studied agglomeration, the placement conditions and the choice of transport hub locations. The model is formed on the base of 4-step approach, the trips distribution in a network is based on entropy approach which is considered in the second section in more details. The placement conditions go from an idea to minimize time total spending on moving, the number of hubs being introduced is limited by their construction financing.

The approach application is demonstrated on the example of northwestern urban agglomeration Sertolovo-Osinovaya Roshcha-Pargolovo which represents being active-built-up residential districts on St. Petersburg city border. The specificities of its

transport network, including also hubs and highways with complicated traffic, are determined. Based on open sources and statistical data, a transport model was developed, its calibration was pursued. 3 options for placing transport hubs on network of the agglomeration are presented. As a result of the research, the analysis for the options of transport hub placements is presented and the most promising option from the view of purpose meaning achievement for hub placement in being considered agglomeration is proposed.

Keywords: transport planning; urban agglomeration; transport hub; street-and-road network; transport modeling.

References

1. Sakul'eva T. N. Transportnyy spros kak funktsiya sostoyaniya transportnoy seti [Transport demand as a function of the state of the transport network]. *Upravlenie* [Management]. 2019, vol. 7, iss. 3, pp. 47–53. DOI: 10.26425/2309-3633-2019-3-47-53. (In Russian)
2. Sibirko I. V., Stepushina E. A. *Mobil'nost' naseleniya kak sotsial'nyy prioritet gosudarstvennoy transportnoy politiki i faktor povysheniya kachestva zhizni naseleniya Rossii. Problemy i perspektivy ekonomiki i upravleniya: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2018 g.)* [Population mobility as a social priority of the state transport policy and a factor in improving the quality of life of the population of Russia. Problems and prospects of economics and management: materials of the VII Intern. scientific conf. (St. Petersburg, July 2018)]. SPb.: Svoe izdatel'stvo Publ., 2018, pp. 5–10. (In Russian)
3. Goel P., Kumar A., Parayitam S. et al. Understanding transport users' preferences for adopting electric vehicle based mobility for sustainable city: A moderated moderated-mediation model. *Journal of Transport Geography*, 2023, Iss. 106.
4. Plotnikov D. G., Stakhin D. R., Banite A. V. Primenenie korotkikh kol'tseykh marshrutov dlya optimizatsii transportnoy seti rayona [The use of short ring routes to optimize the transport network of the area]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: materialy yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 10–11 noyabrya 2020 goda. FGBUN Institut problem transporta im. N. S. Solomenko Rossiyskoy akademii nauk, 2020* [Transport of Russia: problems and prospects — 2020: materials of the anniversary International Scientific and practical conference, St. Petersburg, November 10–11, 2020. FGBUN Institute of Transport Problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 2020.]. SPb.: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2020, vol. 2, pp. 41–45. (In Russian)
5. Glushenkova E. D., Kleptsova L. N. Analiz metodicheskogo obespecheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya [Analysis of methodological support of the quality of transport services for the population]. *Voprosy sovremennoy nauki: problemy, tendentsii i perspektivy: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novokuznetsk, 5–6 dekabrya 2019 goda. Otv. red. E. I. Zabneva* [Questions of modern science: problems, trends and prospects: materials of the III International scientific and practical conference, Novokuznetsk, 5– December 6, 2019. Rep. ed. E. I. Zabneva.]. Novokuznetsk: Zebra Publ., 2019, pp. 37–41. (In Russian)
6. Karablin O. V. Ob osobennostyakh formirovaniya transportnoy sistemy i transportnogo sprosa Rostovskoy aglomeratsii [On the features of the formation of the transport system and transport demand of the Rostov agglomeration]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2021, Iss. 9(315), pp. 38–44. (In Russian)
7. Plotnikov D. G., Banite A. V., Stakhin D. R. Podkhod k optimizatsii struktury sistemy upravleniya transportnymi potokami [An approach to optimizing the structure of the traffic management system]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: materialy yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 10–11 noyabrya 2020 goda* [Transport of Russia: problems and prospects - 2020: materials of the anniversary International scientific and practical conference, St. Petersburg, November 10–11, 2020]. SPb.: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2020, pp. 45–48. (In Russian)
8. Lindkvist H., Melander L. How sustainable are urban transport services? A comparison of MaaS and UCC. *Research in Transportation Business & Management*. 2022, Iss. 43.
9. Savenkova T. I. Vozmozhnosti povysheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya Sankt-Peterburga [Opportunities to improve the quality of transport services for the population of St. Petersburg]. *Sistemnyy analiz i logistika* [System analysis and logistics]. 2019, Iss. 3(21), pp. 29–44. (In Russian)
10. Borbás P. D. The Importance of the Quality of Urban Public Transport and a Methodological Example for Weighting the Typical Quality Criteria. *Regionalnaya ekonomika. Yug Rossii*, 2022, pp. 89–96.
11. Odame P. K., Sam E. F., Amoako-Sakyi R. O. et al. State of public transport services to Ghana's disability population: Lessons from public transport operators in the Accra Metropolitan Assembly. *Social Sciences & Humanities Open*, 2023, Iss. 7(1).
12. Durand A., Zijlstra T. Public transport as travel alternative for users of Special Transport Services in the Netherlands. *Journal of Transport & Health*, 2023, Iss. 29.
13. Zhou T., Zhang J., Peng L. et al. Exploring the determinants of public transport usage and shared mobilities: A case study from Nanchang, China. *Sustainable Cities and Society*, 2022, Iss. 87.
14. Kaliberda E. A., Fedotova I. V., Nesterov V. V. Sravnitel'nyy analiz sistem oplaty proezda obshchestvennogo transporta [Comparative analysis of public transport fare systems]. *International Journal of Advanced Studies*. 2019, vol. 9, Iss. 1–2, pp. 38–44. (In Russian)
15. Losin L. A., Bulycheva N. V. Issledovanie vliyaniya stoimosti proezda na transportnyy spros metodom matematicheskogo modelirovaniya [Study of the influence of fare on transport demand by mathematical modeling]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 2, pp. 179–194. (In Russian)
16. Nes van R. Lecture 2.2. Trip Distribution. Available at: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/2.2-Trip-distribution.pdf> (accessed: December 25, 2022).

ПОСТРОЕНИЕ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОДОВ ХЭММИНГА С КОНТРОЛЕМ САМОДВОЙСТВЕННОСТИ ВЫЧИСЛЯЕМЫХ ФУНКЦИЙ

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
ПОГОДИНА Татьяна Сергеевна, студент³; e-mail: pogodina-ts@mail.ru

¹ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург

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

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

Рассматривается задача синтеза самопроверяемых цифровых устройств, в которых для обеспечения свойства обнаружения ошибок в вычислениях используются временная избыточность и импульсное представление сигналов. Предложена структура организации самопроверяемых комбинационных устройств со схемами встроенного контроля, основанная на использовании модифицированных кодов Хэмминга с самодвойственными функциями, описывающими проверочные символы. Описаны принципы построения модифицированных кодов Хэмминга. Доказано, что проверочные символы модифицированных кодов Хэмминга будут описываться самодвойственными функциями только для случаев значений числа информационных символов $m = 2^k - 2$, $k \in \mathbb{N}$ ($k > 1$), где k — число проверочных символов. Приведена «базовая» структура организации контроля вычислений в комбинационных устройствах на основе модифицированных кодов Хэмминга с числом информационных символов $m = 6$, проверочные символы которых описываются самодвойственными булевыми функциями. При контроле вычислений устройствами с числом выходов, большим шести, производится разбиение множества выходов на подмножества, для выходов каждого из которых синтезируется отдельная схема контроля; выходы схем контроля для различных групп выходов объединяются на входах самопроверяемого компаратора для получения одного контрольного сигнала. Таким образом, предложена структура организации контроля вычислений по двум диагностическим признакам — принадлежности кодовых слов модифицированным кодам Хэмминга и вычисляемых функций, описывающих проверочные символы, классу самодвойственных булевых функций. Такой подход, как показано в статье, позволяет повысить показатели контролепригодности и увеличить число тестовых комбинаций по сравнению с контролем вычислений только на основе модифицированного кода Хэмминга. Приводятся результаты моделирования самодвойственных комбинационных цифровых устройств в среде Multisim. Освещены особенности реализации блоков схемы встроенного контроля и их функционирования. Применение предложенного способа организации цифровых устройств перспективно в практике реализации надежных и безопасных систем управления в широком спектре отраслей науки и техники.

Ключевые слова: самопроверяемое устройство; самодвойственные цифровые устройства; контроль вычислений на выходах цифровых устройств; временная избыточность; контроль самодвойственности; контроль вычислений по модифицированным кодам Хэмминга.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-99-123

▼ Введение

Вопросам обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях при разработке и проектировании систем управления в промышленности и на транспорте уделяется особое внимание. Необходимо парировать любые опасные воздействия на технологический процесс, а также максимально снизить риск его

остановки в случае фиксации отклонений в выполняемых вычислительных процедурах. Это в полной мере присуще и процессу разработки систем управления движением на транспорте, например железнодорожном [1]. При реализации современных систем управления движением поездов на станциях и перегонах на микроэлектронной и микропроцессорной

основах придерживаются концепции, при которой любой одиночный дефект аппаратных или программных средств не должен приводить к возникновению опасного отказа в системе, своевременно обнаруживаться до наступления второго дефекта, а неверно вычисленные данные — блокироваться [2]. Следование именно такой концепции построения систем управления движением поездов позволяет достигать высоконадежных и безопасных реализаций технических средств. С развитием техники и технологий станет возможным также и учет возможных дефектов инфраструктурного комплекса при выполнении алгоритмов управления движением поездов с применением микроэлектронных и микропроцессорных систем [3].

Зачастую при построении надежных и безопасных микроэлектронных и микропроцессорных устройств для исключения нарушения алгоритмов функционирования и парирования ошибок применяют методы контроля вычислений на различных уровнях реализации блоков, узлов и подсистем [4, 5]. Широко применяют контроль по заданному модулю $M \geq 2$, проверку мантиссы, сигнатурный анализ данных, двухфазное кодирование, контроль вычислений по заранее выбранному избыточному коду и пр. [6, 7].

Особое место среди всех способов обеспечения контроля вычислений занимает применение избыточного кодирования [8–11]. Использование кодовых методов на практике позволяет решать задачу обнаружения ошибок и, при необходимости, коррекции их проявлений с наименьшими аппаратными затратами [12]. Для этого используют разнообразные равномерные избыточные коды, наиболее часто из которых в научной литературе упоминаются равновесные коды, коды Бергера и коды Хэмминга [13–15]. Используются также и различные их модификации [9–11].

Одна из простейших модификаций кодов Хэмминга описана в [16, 17]. Данный модифицированный код Хэмминга обладает свойством обнаружения любых одно- и двукратных ошибок в информационных символах (но не во всем кодовом слове!). При этом число проверочных символов для данного кода равно числу проверочных символов для кода Хэмминга,

а при определенных диапазонах значений числа информационных символов — меньше на единицу. К примеру, при числе информационных символов $m = 5...7$ число проверочных символов у модифицированных кодов Хэмминга $k = 3$, что на один меньше, чем у классических кодов Хэмминга; при $m = 12...15$ $k = 4$ при $m = 27...31$ $k = 5$ и т. д. Проверочные символы модифицированных кодов Хэмминга описываются более простыми функциями, чем проверочные символы классических кодов Хэмминга. Эти преимущества модифицированных кодов Хэмминга могут эффективно использоваться при синтезе устройств с обнаружением неисправностей и ошибок в вычислениях. Особенности обнаружения ошибок модифицированными кодами Хэмминга и их применения при синтезе самопроверяемых устройств освещены в ряде работ, например в статьях [16, 17] и в монографиях [11, 18].

Исследования показывают, что модифицированные коды Хэмминга при определенном числе информационных символов обладают важной особенностью, которая позволяет применять их при синтезе схем встроенного контроля (СВК) с использованием сразу же двух диагностических признаков — с контролем принадлежности формируемых в СВК функций модифицированному коду Хэмминга и с контролем принадлежности каждой функции, описывающей проверочные символы, классу самодвойственных булевых функций. Использование двух диагностических признаков без существенного увеличения структурной избыточности устройства позволяет увеличивать количество обнаруживаемых ошибок, а также повышать число тестовых комбинаций, что особенно актуально для систем автоматики, в которых входные данные могут меняться не столь часто [19, 20]. Такой подход к организации СВК ранее рассматривался для применения некоторых равновесных кодов совместно с принципом логического дополнения (логической коррекции сигналов) [21–24]. В данных работах предполагается разбиение выходов объектов диагностирования на группы и контроль каждой из них с помощью равновесных кодов « r из $2r$ ». При этом сигналы от объекта диагностирования в СВК корректируются таким образом, чтобы каждая функция, описывающая бит равновесного кода, была самодвойственной.

В статьях [21, 22] описывается такой подход к организации контроля вычислений с применением равновесного кода «2 из 4». В [23] авторами применяется дополнительная схема сжатия для контроля вычислений устройствами с большим, чем четыре, числом выходов. В [24] результаты предыдущих исследований обобщены и предложена *гибридная структура* организации СВК по методу логической коррекции сигналов с контролем вычислений по двум диагностическим признакам; приводятся примеры применения для организации СВК равновесных кодов «2 из 4» и типовых модулей сжатия парафазных сигналов (в штатном режиме на их входах используются комбинации <0101>, <0110>, <1001> и <1010>, также принадлежащие коду «2 из 4»). Развитием данных работ можно считать [25], где соавторы настоящей статьи исследуют возможности применения классических кодов Хэмминга для синтеза СВК по двум диагностическим признакам без использования принципов логической коррекции сигналов и схем их сжатия, демонстрируя возможности применения линейных кодов при организации самодвойственных самопроверяемых устройств.

Целью представленного исследования является изучение особенностей организации контроля вычислений комбинационными устройствами автоматики и вычислительной техники с помощью модифицированных кодов Хэмминга, для которых проверочные символы описываются самодвойственными булевыми функциями.

1. Модифицированные коды Хэмминга, проверочные символы которых описываются самодвойственными булевыми функциями

Рассмотрим принципы построения модифицированных кодов Хэмминга (далее будем использовать также обозначение H^M -коды). Проверочная матрица данного кода имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Матрица (1) позволяет построить H^M -коды для числа информационных символов $m = 2 \dots 15$. Для больших значений m проверочная матрица строится аналогично с увеличением числа строк и столбцов.

Столбцы матрицы (1) слева направо соответствуют информационным символам, начиная с младшего f_1 . Строки матрицы (1), считая снизу вверх, соответствуют проверочным символам, начиная с младшего g_1 . При построении H^M -кода определяется число информационных символов m . Далее, при формировании проверочного символа $g_i, i \in \{1, 2, \dots, \lceil \log_2(m+1) \rceil\}$, суммируются по модулю $M = 2$ те информационные символы, для которых на пересечении соответствующих строки и столбца стоит единица. К примеру, для H^M -кода со значением $m = 6$ имеем следующие правила вычисления значений проверочных символов:

$$\begin{aligned} g_3 &= f_4 \oplus f_5 \oplus f_6; \\ g_2 &= f_2 \oplus f_3 \oplus f_6; \\ g_1 &= f_1 \oplus f_3 \oplus f_5. \end{aligned} \tag{2}$$

H^M -коды обладают свойством обнаружения любых одно- и двукратных ошибок и в информационных символах, что позволяет их эффективно использовать при синтезе СВК [16–18]. При этом, в отличие от классических кодов Хэмминга, H^M -коды обладают сравнимой, и для ряда значений m на единицу меньшей, избыточностью ($k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ — число проверочных символов), а также более простыми функциями, описывающими проверочные символы.

В системе функций (2) используются только линейные операции. Эта особенность говорит о том, что проверочные символы H^M -кода не будут являться монотонными (такое свойство часто используется при контроле вычислений цифровыми устройствами [26, 27]), однако при определенных значениях m H^M -коды обладают важным свойством, позволяющим использовать его при организации контроля вычислений [25].

Теорема 1. *Линейная булева функция будет самодвойственной только в том случае, если имеет нечетное количество аргументов, от которых она зависит существенно.*

Доказательство. Функция является само-двойственной, если выполняется равенство:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_t) = \overline{f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_t})}, \quad (3)$$

где t — число входных переменных.

Рассмотрим произвольную линейную функцию:

$$f = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_{q-1} \oplus x_q, \quad q \in \{1, 2, \dots, t\}. \quad (4)$$

Предположим, q есть число аргументов в функции. При этом q_0 — число нулевых аргументов, а q_1 — число единичных аргументов. Ясно, что $q = q_0 + q_1$.

Рассмотрим случай, когда q — четное число. Тогда существует два варианта. Первый, когда q_0 четно. Соответственно четно и q_1 . При инвертировании значений всех аргументов четность числа единиц не нарушится. Следовательно, функция примет точно такое же значение, что и на неинвертированных аргументах. Второй вариант — когда q_0 нечетно. Нечетным будет и q_1 в таком случае. Инвертирование всех аргументов приведет к тому, что число единиц останется нечетным. Функция не поменяет своего значения. Случай, когда q четно, описывает несамо-двойственные функции.

Рассмотрим теперь случай, когда q является нечетным числом. Тогда также существует два варианта. Первый — когда q_0 четно и q_1 нечетно. Второй — наоборот. При инвертировании всех аргументов четность числа единиц нарушится. Отсюда следует, что функция примет противоположное значение при инвертировании значений всех аргументов. Таким образом, случай, когда q нечетно, характеризует как раз само-двойственные функции. **Теорема доказана.**

Анализ правил построения H^M -кодов позволил установить следующую важную их особенность.

Теорема 2. *H^M -коды будут иметь все само-двойственные функции, описывающие проверочные символы, в том случае, если:*

$$m = 2^k - 2, \quad k \in \mathbb{N} \quad (k > 1). \quad (5)$$

Доказательство. При обозначенном в выражении (5) числе информационных символов каждый из проверочных символов будет

описываться функцией с нечетным количеством аргументов, от которых они зависят существенно. Это вытекает из таких соображений. В матрице (1) при условии $m = 2^k - 1$, $k \in \mathbb{N}$ ($k > 1$) достигается максимальное заполнение столбцов для данного числа проверочных символов. Последний информационный символ в этом случае используется в формировании всех функций, описывающих проверочные символы, а суммы единиц, записанных в каждой строке, в точности равны 2^{k-1} , где k — число проверочных символов. Число 2^{k-1} является четным. Если рассмотреть значение $m = 2^k - 2$, то как раз для суммы единиц в каждой строке потребуется отнять по одной единице от числа 2^{k-1} . Тем самым мы получим нечетное число слагаемых для каждой строки. На основании теоремы 1 все функции, описывающие проверочные символы H^M -кода, при выполнении условия (5) будут само-двойственными. **Теорема доказана.**

Будем далее использовать следующий устоявшийся в теории синтеза цифровых устройств термин.

Определение 1. *Устройства, выходы которых описываются само-двойственными функциями, называются само-двойственными цифровыми устройствами.*

Особенности синтеза само-двойственных вычислительных устройств и систем рассмотрены в большом количестве работ, включая основные статьи [28–32] и три монографии [33–35]. Кодеры H^M -кодов при условии $m = 2^k - 2$, $k \in \mathbb{N}$ будут являться само-двойственными устройствами (см. теорему 2).

Применяя H^M -коды для организации СВК с использованием двух диагностических признаков, можно значительно повысить число тестовых комбинаций для неисправностей комбинационных схем.

2. Базовая структура организации само-двойственного контроля вычислений по модифицированным кодам Хэмминга

Из выражения (5) следует, что кодер H^M -кодов, выходы которых описываются системой функций (2), является само-двойственным устройством. Эту особенность модифицированного кода Хэмминга при $m = 6$ можно эффективно использовать при синтезе диагностического обеспечения цифровых устройств.

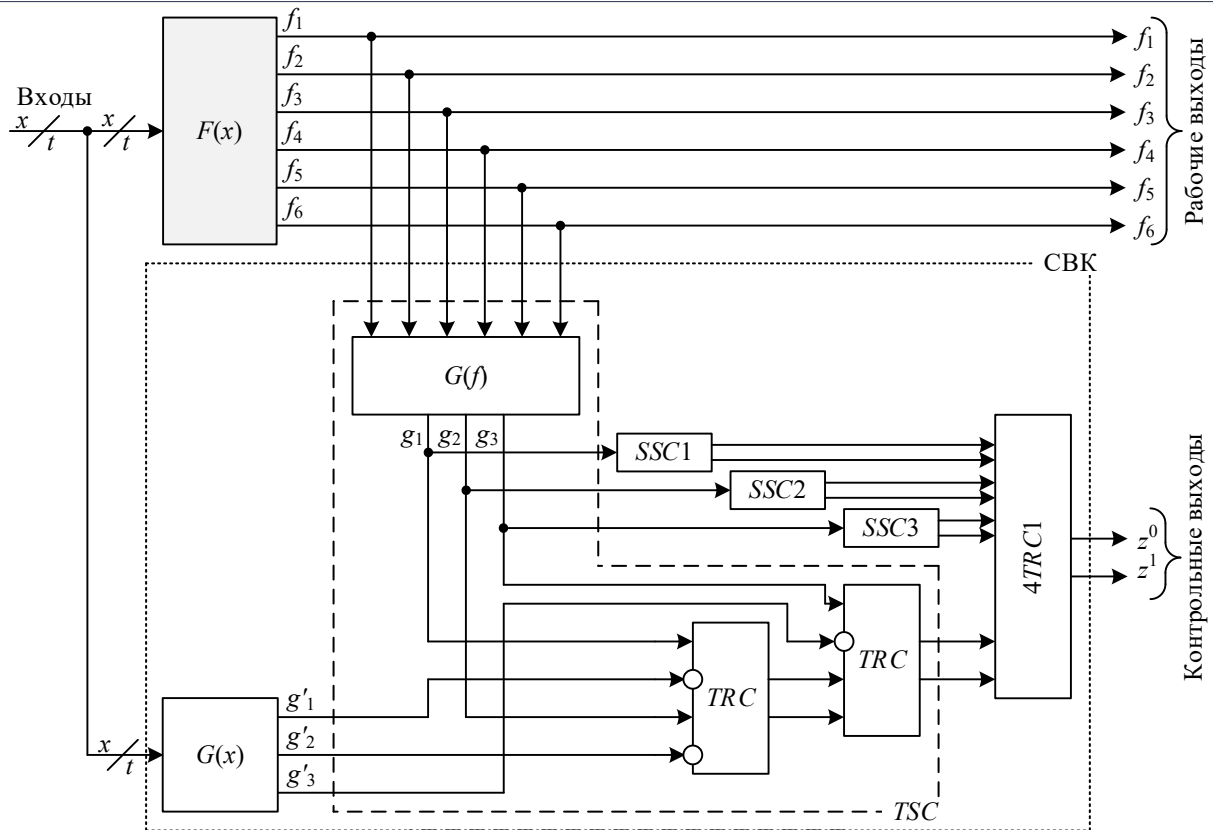


Рис. 1. «Базовая» структура организации СВК на основе модифицированного кода Хэмминга с самодвойственными функциями

На рис. 1 приведена структура организации СВК на основе H^M -кода со значением $t = 6$ с самодвойственными функциями.

Определение 2. Назовем структуру, приведенную на рис. 1, «базовой» структурой организации самодвойственного контроля вычислений по H^M -кодам со значением числа информационных символов $t = 6$.

Базовая структура организуется для группы из шести выходов исходного комбинационного устройства. Аналогичный подход используется при контроле вычислений на основе равновесных кодов. К примеру, «базовые» структуры для контроля вычислений по равновесным кодам «1 из 3» с применением метода логического дополнения (логической коррекции сигналов) приведены в [36], для кодов «1 из 4» — в [37], для кодов «2 из 4» — в [38], для кодов «1 из 5» — в [39] и т. д. Множество выходов устройства разбивается на несколько подмножеств, «покрываемых» выбранными кодами, а затем для каждого подмножества выходов синтезируется своя СВК. Выходы отдельных СВК подключаются к входам самопроверяемого компаратора [40]. Таким образом, полная схема контроля собирается из «базовых» СВК.

В «базовой» структуре рис. 1 исходное устройство $F(x)$, снабженное t входами и шестью выходами f_1, f_2, \dots, f_6 , дооснащается СВК, включающей в себя: блок контрольной логики $G(x)$, самопроверяемый тестер H^M -кода (TSC — *totally self-checking checker*), каскад тестеров самодвойственности ($SSC1$ — $SSC3$, *self-dual self-checking checker*), схему сжатия четырех парафазных сигналов в один сигнал $z^0 z^1$ (устройство $4TRC1$ — *two-rail checker 4 → 1* (для сжатия четырех сигналов в один)).

Тестер H^M -кода реализован в виде каскадного соединения кодера $G(f)$ и компаратора, включающего в себя два стандартных модуля сжатия парафазных сигналов TRC [8]. Кодер преобразует сигналы со входов f_1, f_2, \dots, f_6 в контрольные сигналы g_1, g_2, g_3 (они соответствуют проверочным символам H^M -кода). В свою очередь, блок $G(x)$ по значениям входов x_1, x_2, \dots, x_t формирует альтернативные контрольные сигналы g'_1, g'_2, g'_3 , которые подаются на входы TSC . Одноименные сигналы g_1, g_2, g_3 и g'_1, g'_2, g'_3 сравниваются на входах компаратора. Так как компаратор TRC работает в парафазной логике, предварительно сигналы от одного из

устройств $G(f)$ или $G(x)$ инвертируются. В данном случае инвертированы сигналы от блока контрольной логики. К слову, он может сразу реализовываться в виде устройства, на котором вычисляются функции $\overline{g'_1}, \overline{g'_2}, \overline{g'_3}$. Для контроля самодвойственности функций g_1, g_2, g_3 установлены тестеры $SSC1$ – $SSC3$, принцип действия которых описан в [25]. Сигналы от тестеров самодвойственности и тестера H^M -кода поступают на $4TRC1$. Выходы данного устройства одновременно являются и контрольными выходами СВК.

При работе структуры рис. 1 возможно возникновение неисправностей (устойчивых отказов или сбоев) в любом из ее блоков, что будет влиять на результаты вычислений. Наиболее вероятная одиночная неисправность может произойти либо в устройстве $F(x)$, либо в одном из блоков СВК. СВК синтезируется самопроверяемой, поэтому неисправности в ней фиксируются в виде нарушения парафазности сигнала $z^0 z^1$. Неисправности же устройства $F(x)$ влияют на вычисления значений на его рабочих выходах и должны фиксироваться в СВК.

Кроме «базовой» структуры на основе H^M -кода с $m = 6$ и $k = 3$ могут быть построены «базовые» структуры на основе H^M -кодов со значениями: $m = 14, k = 4; m = 30, k = 5; m = 62, k = 6$ и т. д. В табл. 1 приводятся параметры таких модифицированных кодов Хэмминга.

Таблица 1. Параметры H^M -кодов с самодвойственными кодерами

k	m	R
3	6	0,66667
4	14	0,77778
5	30	0,85714
6	62	0,91176
7	126	0,94737
8	254	0,96947
9	510	0,98266
10	1022	0,99031
...
20	1048574	0,99998
...
50	1125899906842620	1

С ростом значения k значительно увеличивается кодовая скорость R H^M -кода. Значение $2^k - 2$ для рассматриваемого подмножества H^M -кодов вычисляется по формуле:

$$R = \frac{m}{m+k} = \frac{2^k - 2}{2^k - 2 + k}. \quad (6)$$

Устремляя k к ∞ и находя предел выражения (6), получаем:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} R = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2^k - 2}{2^k - 2 + k} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(2^k - 2)'}{(2^k - 2 + k)'} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2^k \ln 2}{2^k \ln 2 + 1} = 1. \quad (7)$$

Чем больше значение k , тем более эффективен код с позиции его избыточности и тем эффективнее будет его применение в части структурной избыточности конечного устройства. Другими словами, при организации контроля вычислений устройствами с большим числом выходов более эффективно использование модифицированных кодов Хэмминга с большим числом информационных символов. Это позволяет снижать показатели структурной избыточности самопроверяемого цифрового устройства, чем при использовании H^M -кодов с малым числом информационных символов.

H^M -коды можно комбинировать при организации СВК. К примеру, если число выходов устройства равно 36, то целесообразно контроль вычислений организовать с выделением двух групп выходов — с шестью и с тридцатью выходами в каждой. Первую контролировать на основе кода с $m = 6$ и $k = 3$, а вторую — на основе кода с $m = 30$ и $k = 5$. При организации контроля вычислений одни и те же выходы могут использовать в различных СВК, что, например, потребует при нечетном числе выходов исходного устройства или же в случае, если не удастся разбить множество выходов на непересекающиеся подмножества мощностью $m = 2^k - 2, k \in \mathbb{N} (k > 1)$.

3. Моделирование самодвойственных комбинационных устройств

Рассмотрим особенности процесса функционирования структуры рис. 1 на примере

комбинационного устройства, описываемого табл. 2. Из анализа таблицы становится ясным, что данное устройство является самодвойственным, так как $\forall f_i, i = \overline{1, m}, f(x_1, x_2, x_3, x_4) = f(\overline{x_1, x_2, x_3, x_4})$. Необходимо отметить, что для эксперимента было сразу же выбрано самодвойственное устройство. Однако хорошо известно [29, 30], что устройство, описываемое произвольными булевыми функциями, всегда может быть преобразовано в самодвойственное устройство с использованием всего одной дополнительной переменной.

Таблица 2. Описание самодвойственной комбинационной схемы

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

Для анализа процесса функционирования структуры, приведенной на рис. 1, была использована среда моделирования электронных схем Multisim [41]. В структуре рис. 1 требуется синтезировать по табл. 2 само устройство $F(x)$, а также устройство $G(x)$ в составе СВК. Остальные же блоки в СВК являются типовыми. Процедуры синтеза являются тривиальными, проводятся по известной методике (см. главу 9 в [42]) и здесь опущены.

На рис. 2 и 3 представлены синтезированные в Multisim схемы устройств $F(x)$ и $G(x)$.

Типовыми в структуре рис. 1 являются кодер H^M -кода $G(f)$, тестеры самодвойственности SSC и модули сжатия парафазных сигналов TRC . Компаратор $4TRC1$ в структуре является

также типовым и синтезируется в виде древовидной структуры на трех стандартных элементах TRC . На рис. 4–6 изображены схемы блоков $G(f)$, SSC и TRC , а также временные диаграммы их работы в штатном режиме.

Подключенные согласно структурной схеме, приведенной на рис. 1, исходное устройство $F(x)$ и все элементы СВК (рис. 3–6) приведены на рис. 7.

Работа самопроверяемого самодвойственного устройства смоделирована при подаче всех входных комбинаций. При этом комбинации подавались парами, начиная от (0000, 1111) и заканчивая (0111, 1000). Таким образом, подавалось 8 пар комбинаций. Для этого генератор кодовых слов XWG1 был настроен так, как показано на рис. 8, а. Для контроля работы устройства установлено два логических анализатора XLA1 и XLA2. Анализатор XLA1 позволяет выводить временные диаграммы работы устройств $F(x)$, $G(f)$ и $G(x)$. Анализатор XLA2 предназначен для вывода сигналов с контрольных устройств СВК — тестеров самодвойственности $SSC1$ – $SSC3$, а также модулей сжатия парафазных сигналов $TRC2$ и $TRC5$. Выходы $TRC2$, по сути, являются выходами тестера H^M -кода, который образован устройством $G(f)$ и двумя модулями сжатия парафазных сигналов. Выходы $TRC5$ — это контрольные выходы СВК.

Временные диаграммы работы устройства с СВК изображены на рис. 8, б и в. На временных диаграммах пунктирные отсечки проходят сразу же после двух тактов работы устройства, в которые подается одна из пар входных комбинаций. По рис. 8, б видно, что на каждой паре входных комбинаций все сигналы на выходах устройств $F(x)$, $G(f)$ и $G(x)$ парафазны, что свидетельствует о корректности их работы. Выходы контрольных устройств $SSC1$... $SSC3$, $TRC2$ и $TRC5$ анализируются совместно: на каждой комбинации из каждой пары они должны быть парафазны при штатной работе устройств.

Далее моделировалась работа устройства при действии одиночных константных неисправностей (stuck-at faults) [43]. На рис. 9 приведены временные диаграммы работы устройства при внесении последовательно в схему $F(x)$ двух неисправностей на выходе элемента 1U7 типа stuck-at-0 («константа 0») и stuck-at-1 («константа 1»). Данный элемент связан путями

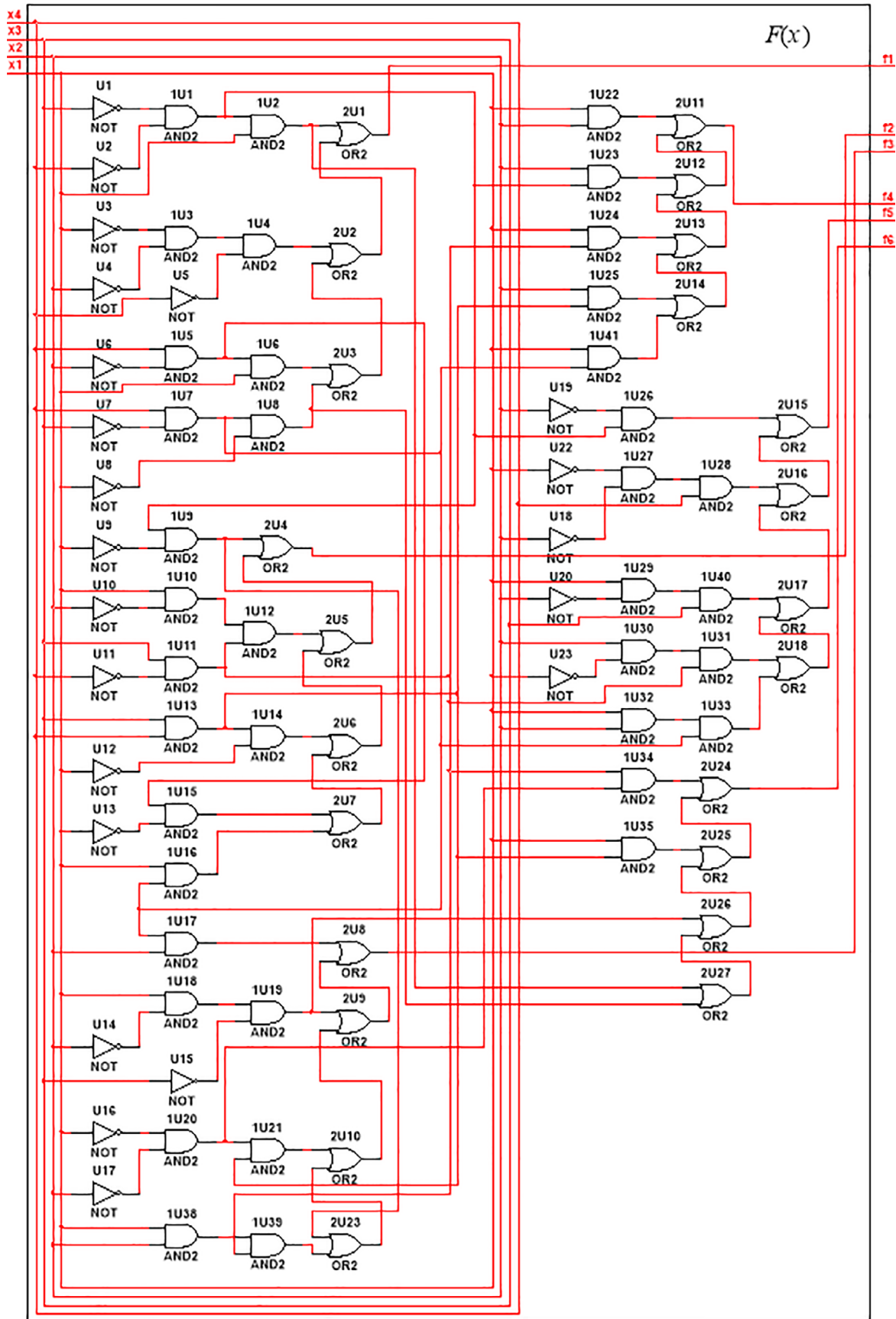


Рис. 2. Схема устройства $F(x)$

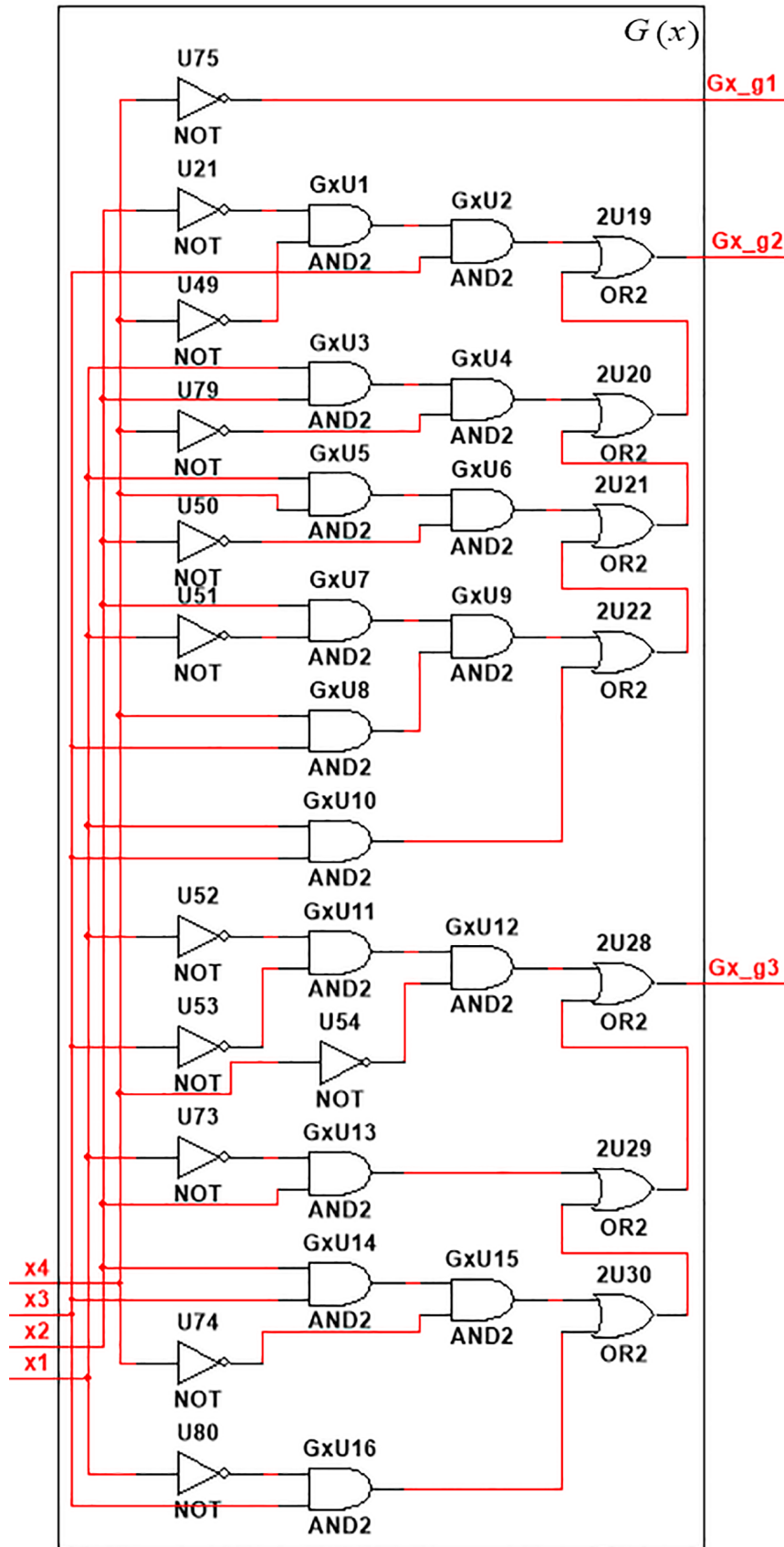
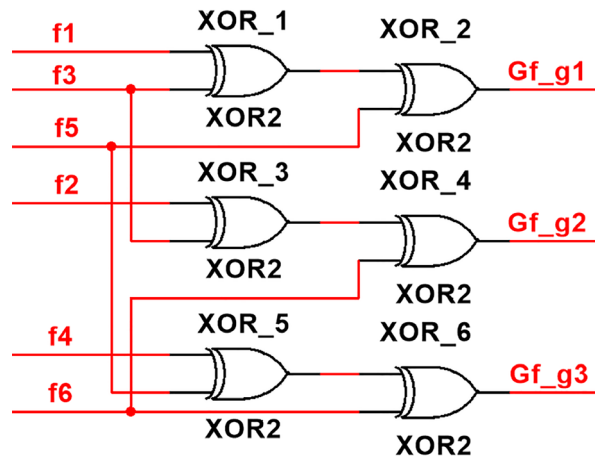
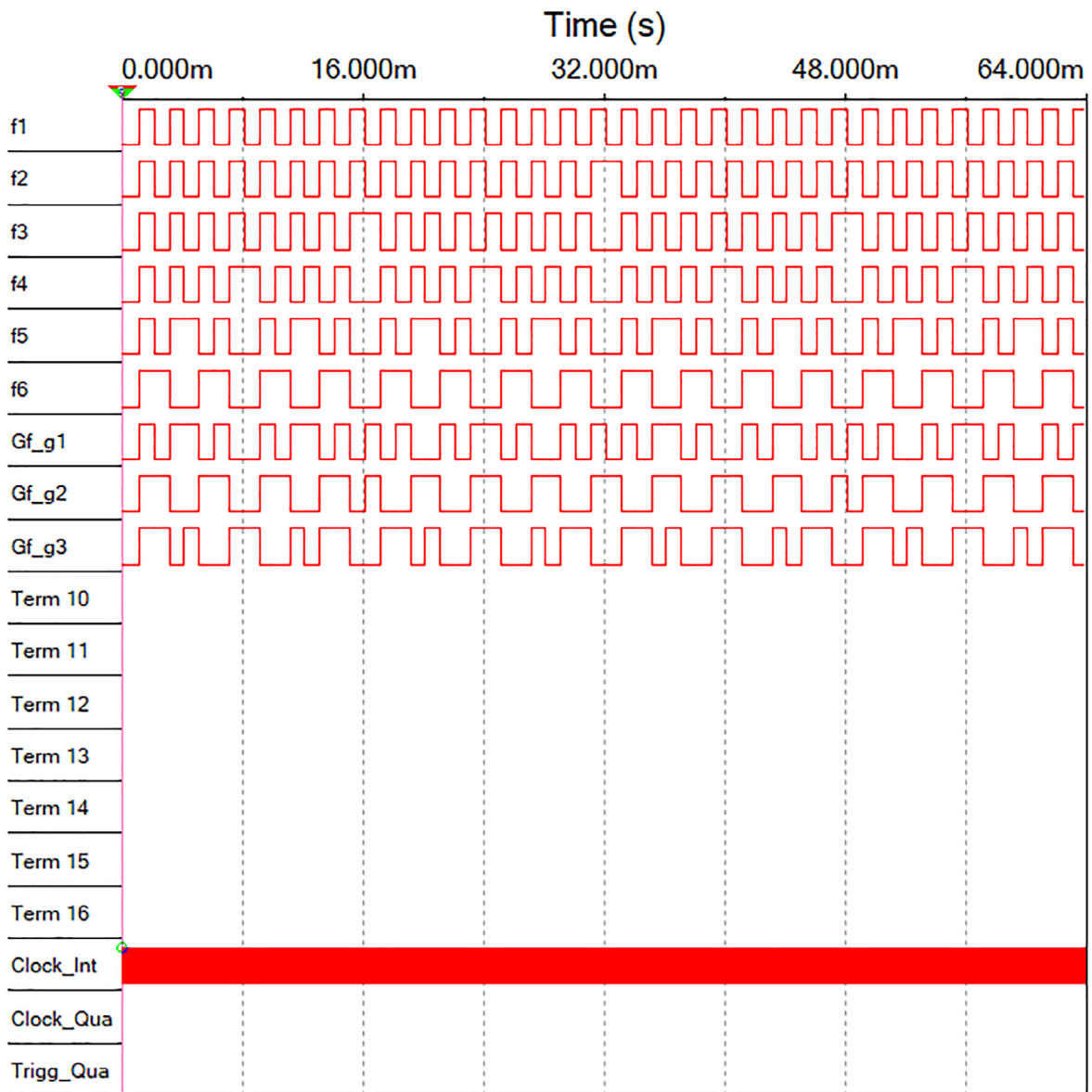


Рис. 3. Схема устройства $G(x)$

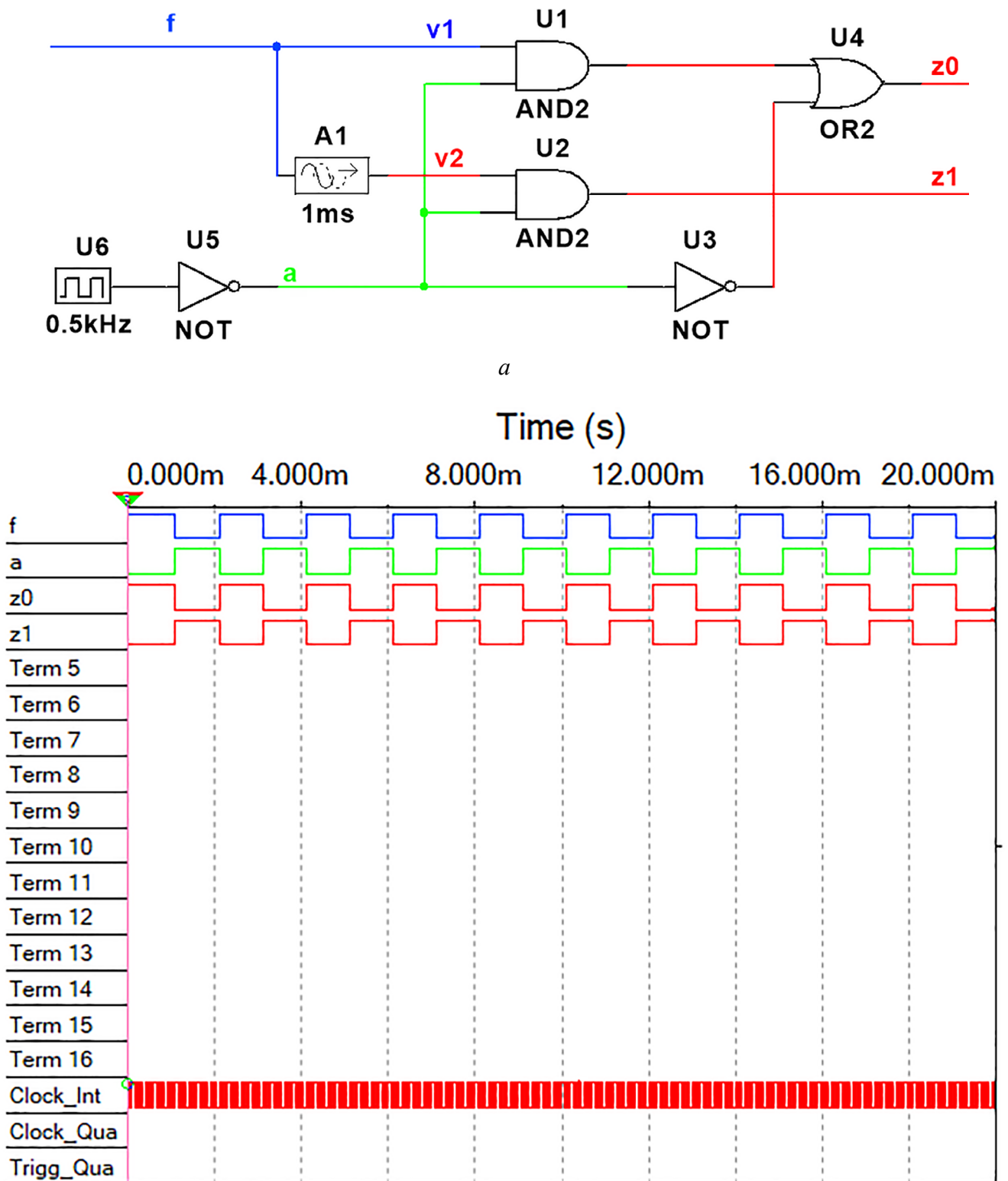


a



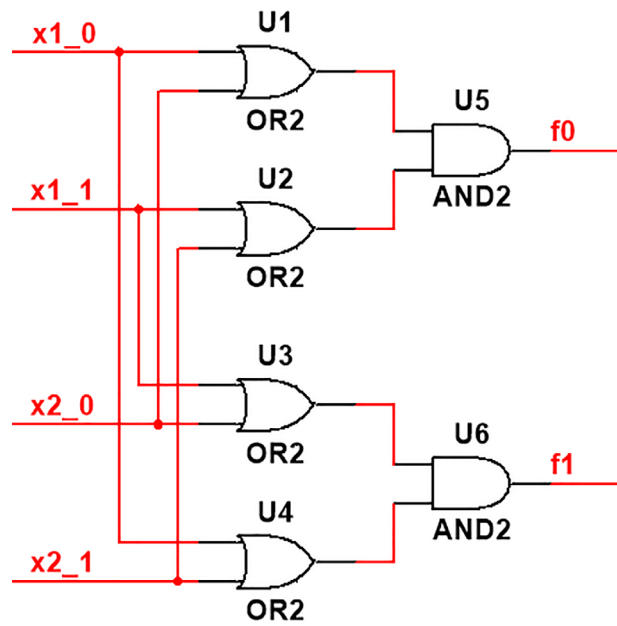
b

Рис. 4. $G(f)$: а — схема; б — временная диаграмма работы

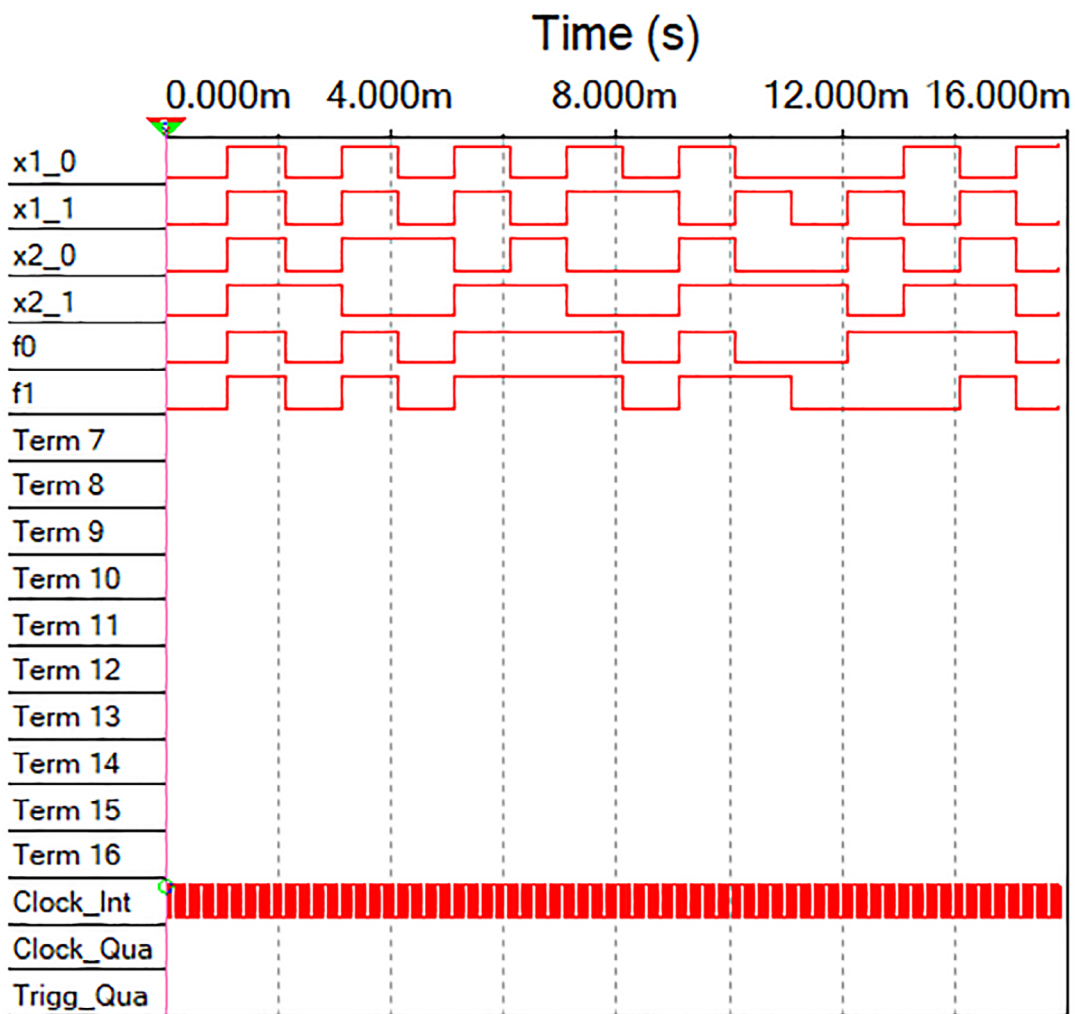


b

Рис. 5. SSC: а — схема; б — временная диаграмма работы



a



b)

Рис. 6. TRC: а — схема; б — временная диаграмма работы

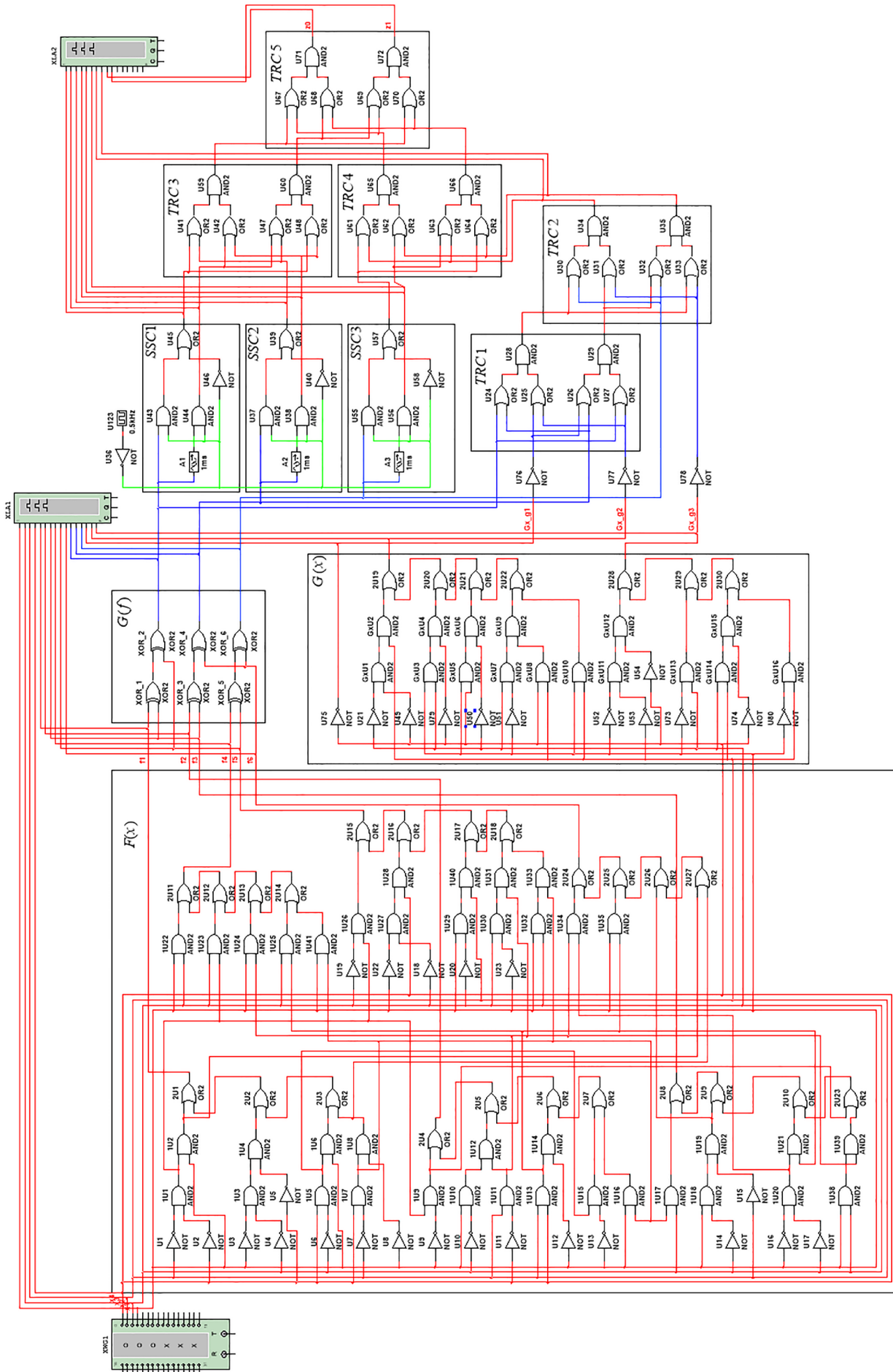
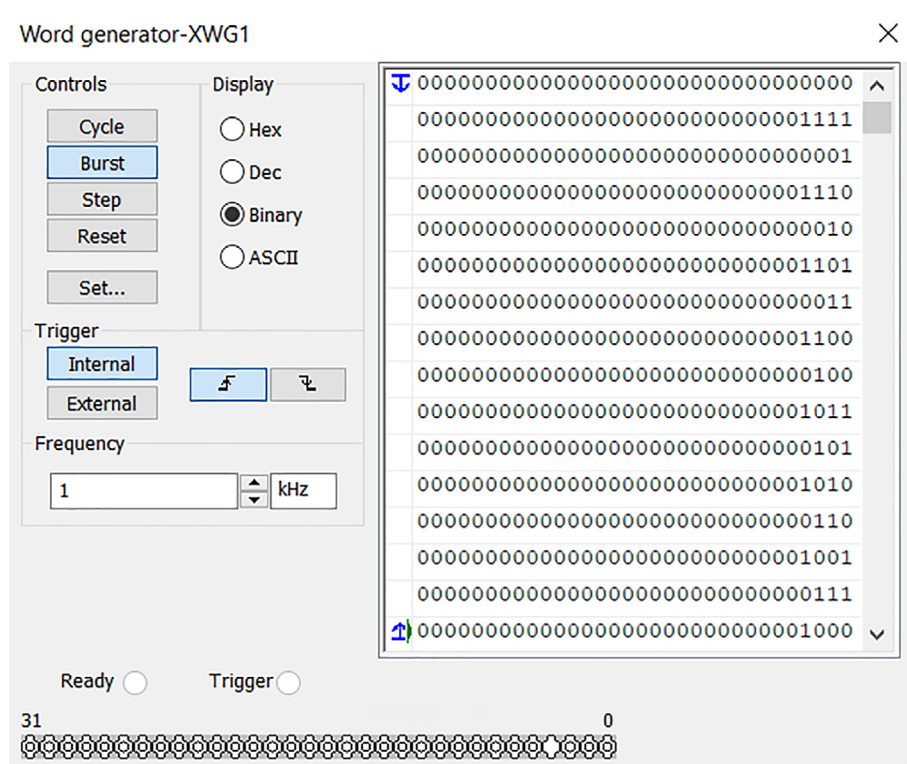
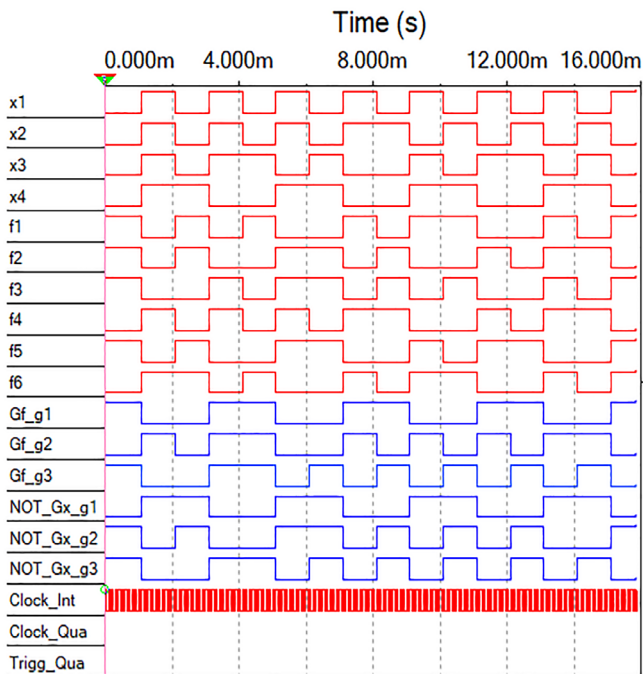


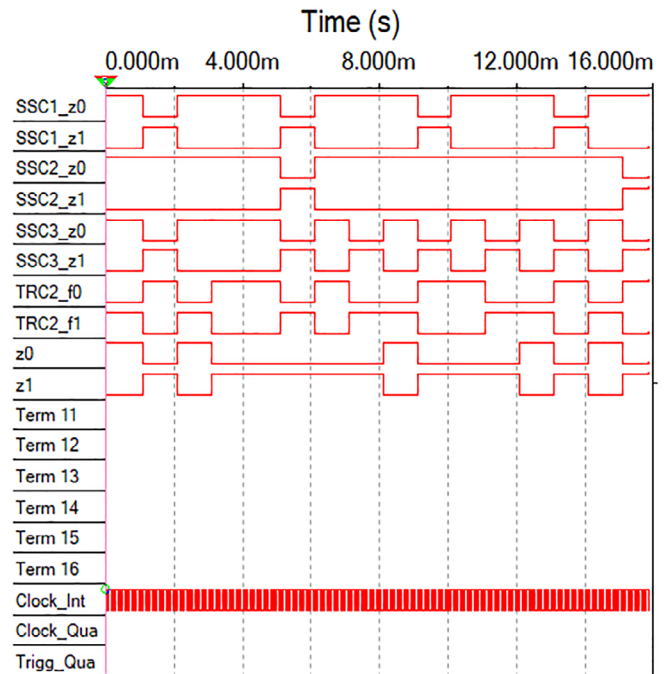
Рис. 7. Самодвиственное устройство со схемой встроенного контроля



a



б



в

Рис. 8. Моделирование работы устройства:
 а — настройка генератора кодовых слов;
 б — временные диаграммы работы устройств $F(x)$, $G(f)$ и $G(x)$;
 в — временные диаграммы работы контрольных устройств СВК

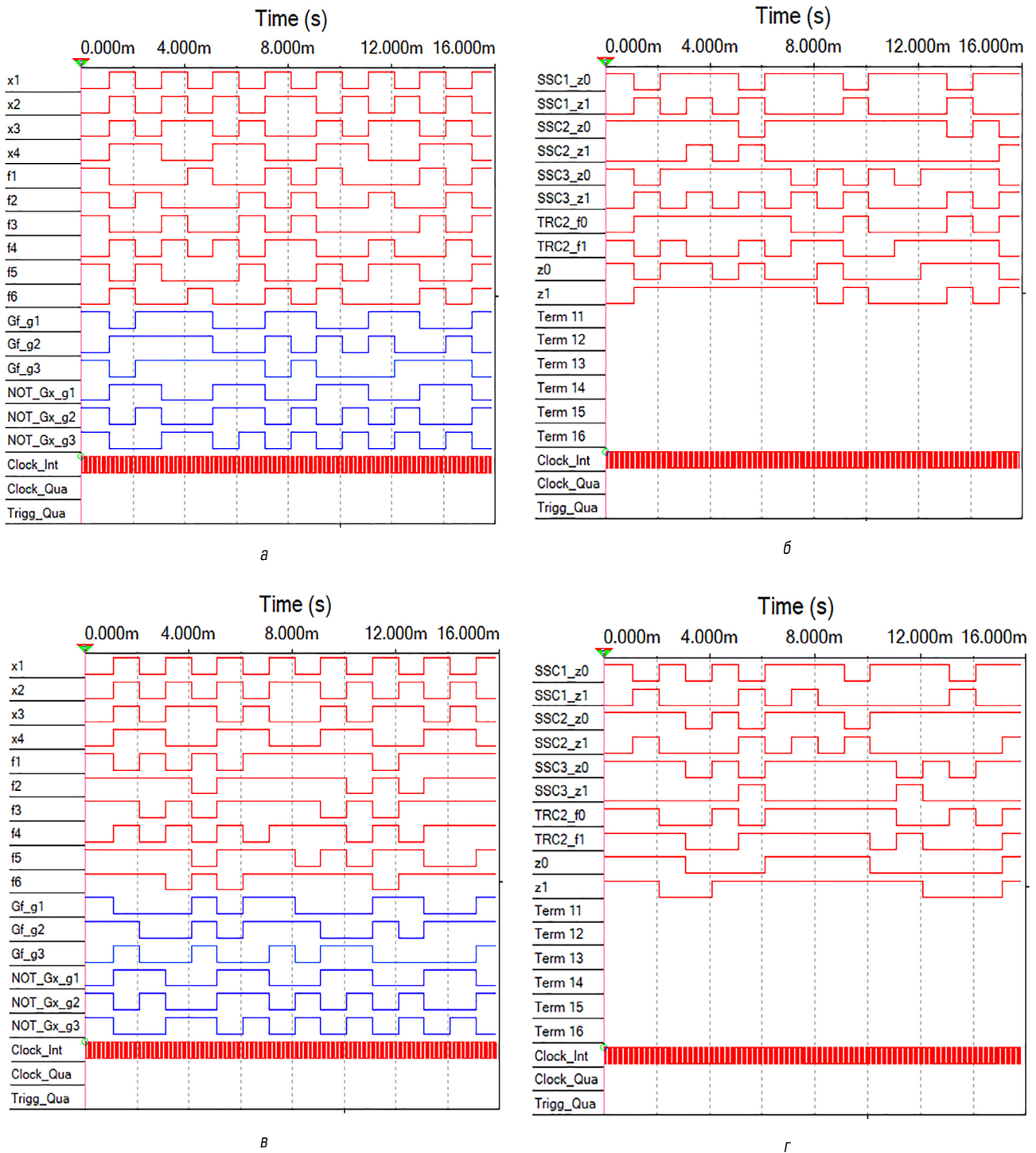


Рис. 9. Моделирование работы устройства при воздействии неисправностей:

a — временные диаграммы работы устройств $F(x)$, $G(f)$ и $G(x)$ с неисправностью типа stuck-at-0 на выходе элемента 1У7; *б* — временные диаграммы работы контрольных устройств СВК с неисправностью типа stuck-at-0 на выходе элемента 1У7; *в* — временные диаграммы работы устройств $F(x)$, $G(f)$ и $G(x)$ с неисправностью типа stuck-at-1 на выходе элемента 1У7; *г* — временные диаграммы работы контрольных устройств СВК с неисправностью типа stuck-at-1 на выходе элемента 1У7

с несколькими выходами устройства $F(x)$, и возникающие в нем неисправности приводят к трансляции на выходы кратной ошибки. Данная ошибка фиксируется контрольными устройствами СВК. В табл. 3 приведены номера тестовых наборов в каждой подаваемой на входы устройства паре при рассмотрении только выходов $TRC2$ (выходы тестера H^M -кода) и выходов $TRC5$ (фактически контрольных выходов СВК). Неисправность типа stuck-at-0 тестируется на парах входных комбинаций № 2, 3, 6 и 7. При этом на выходах $TRC2$ она проявляется только на одной из входных комбинаций. На выходах $TRC5$ при подаче на входы пар № 2 и 6 неисправность проявляется сразу же на обеих входных комбинациях. Гораздо большее количество тестовых комбинаций имеется для неисправности типа stuck-at-1. На выходах и $TRC2$ и $TRC5$ она проявляется на парах № 1, 2, 4, 5, 7 и 8. При этом тестовыми являются обе комбинации из пар № 1, 4, 5, 8 на $TRC2$ и обе комбинации из пар № 1, 4, 5, 7, 8 на $TRC5$. Таким образом, число тестовых комбинаций за счет использования контроля по признаку самодвойственности булевых функций повысилось по сравнению с использованием контроля только по принадлежности к проверочным символам модифицированных кодов Хэмминга (см. табл. 3).

Таблица 3. Тестовые комбинации для неисправностей выхода элемента 1U7

Номер пары	Первая комбинация пары (1)	Вторая комбинация пары (2)	stuck-at-0 на 1U7		stuck-at-1 на 1U7	
			TRC2	TRC5	TRC2	TRC5
1	0000	1111	—	—	1, 2	1, 2
2	0001	1110	1	1, 2	2	2
3	0010	1101	2	2	—	—
4	0011	1100	—	—	1, 2	1, 2
5	0100	1011	—	—	1, 2	1, 2
6	0101	1010	1	1, 2	—	—
7	0110	1001	2	2	1	1, 2
8	0111	1000	—	—	1, 2	1, 2

На рис. 10 приведена диаграмма, показывающая для наиболее используемых в реализации выходных функций элементов (связанных путями с несколькими выходами), насколько повышается доля тестовых комбинаций от

общего их количества на входах: $\zeta_2 = \frac{n_2^c}{n} \cdot 100\%$

и $\zeta_5 = \frac{n_5^c}{n} \cdot 100\%$, где n_2^c и n_5^c — число тестовых

комбинаций на выходах элементов $TRC2$ и

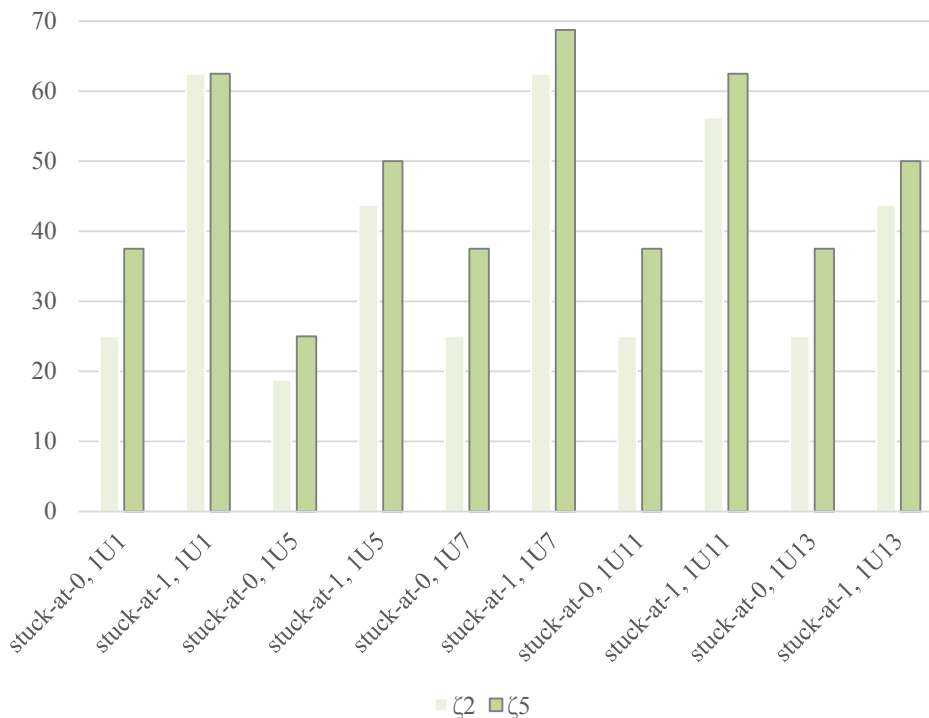


Рис. 10. Сравнение числа тестовых комбинаций для неисправностей элементов объекта диагностирования

$TRC5$ соответственно, а n — общее число комбинаций на входах. Использование двух диагностических признаков для организации контроля вычислений в СВК позволяет увеличивать число тестовых комбинаций по сравнению с использованием только контроля по модифицированному коду Хэмминга.

Приведенный пример показывает, каким образом повышается контролепригодность СВК. Для других примеров может оказаться так, что ряд неисправностей не тестируется на выходах $TRC2$, но за счет контроля самодвойственности тестируется на выходах $TRC5$.

4. δ -преобразование

Использование H^M -кодов, для которых $m \neq 2^k - 2$, $k \in \mathbb{N}$ ($k > 1$), при организации СВК с использованием двух диагностических признаков напрямую невозможно. Однако существует возможность специального преобразования функций, описывающих проверочные символы кода, в самодвойственные.

Определение 3. Назовем δ -преобразованием такое преобразование, при котором выходы кодера модифицированного H^M -кода будут описываться самодвойственными функциями.

δ -преобразование возможно на основании следующей теоремы.

Теорема 3. Для того чтобы функция, описывающая проверочный символ H^M -кода и имеющая четное число аргументов, стала самодвойственной, необходимо и достаточно сложить ее по модулю $M = 2$ с функцией, описывающей старший разряд в векторе аргументов.

Доказательство. Для рассматриваемой функции q четно. Функция, описывающая старший разряд в векторе аргументов (функция f_1), на половине наборов равна 0 и на половине равна 1. Для тех наборов, на которых она равна 0, имеем: $\delta = g \oplus f_1 = g$. Для тех наборов, на которых она равна 1, справедливо: $\delta = g \oplus f_1 = \bar{g}$. Таким образом, при инвертировании всех аргументов инвертируется значение функции. Она будет самодвойственной, что и требовалось доказать.

δ -преобразование позволяет преобразовать H^M -код, для которого $m \neq 2^k - 2$, $k \in \mathbb{N}$ ($k > 1$), в специальный Δ -код, проверочные символы которого описываются самодвойственными булевыми функциями. К примеру, на рис. 11 изображено устройство $\Delta(f)$, представляющее собой кодер Δ -кода. В нем устройство $G(f)$ реализует систему функций H^M -кода при $m = 4$:

$$\begin{aligned} g_3 &= f_4; \\ g_2 &= f_2 \oplus f_3; \\ g_1 &= f_1 \oplus f_3. \end{aligned} \tag{8}$$

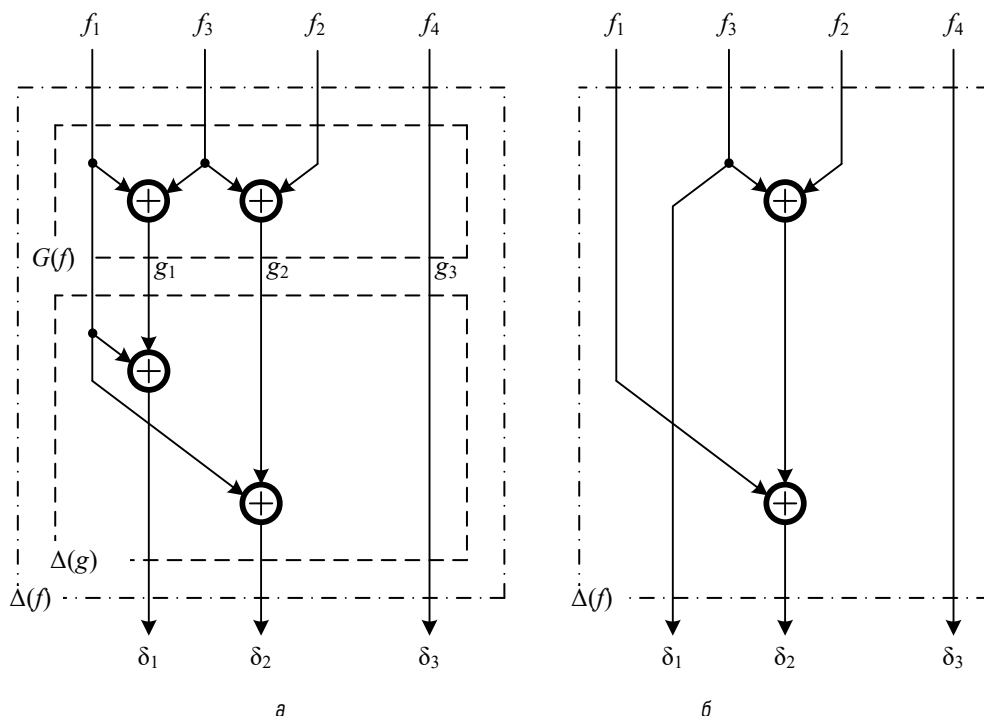


Рис. 11. Устройство $\Delta(f)$: а — каскадное соединение устройств $G(f)$ и $\Delta(g)$; б — оптимизированная структура

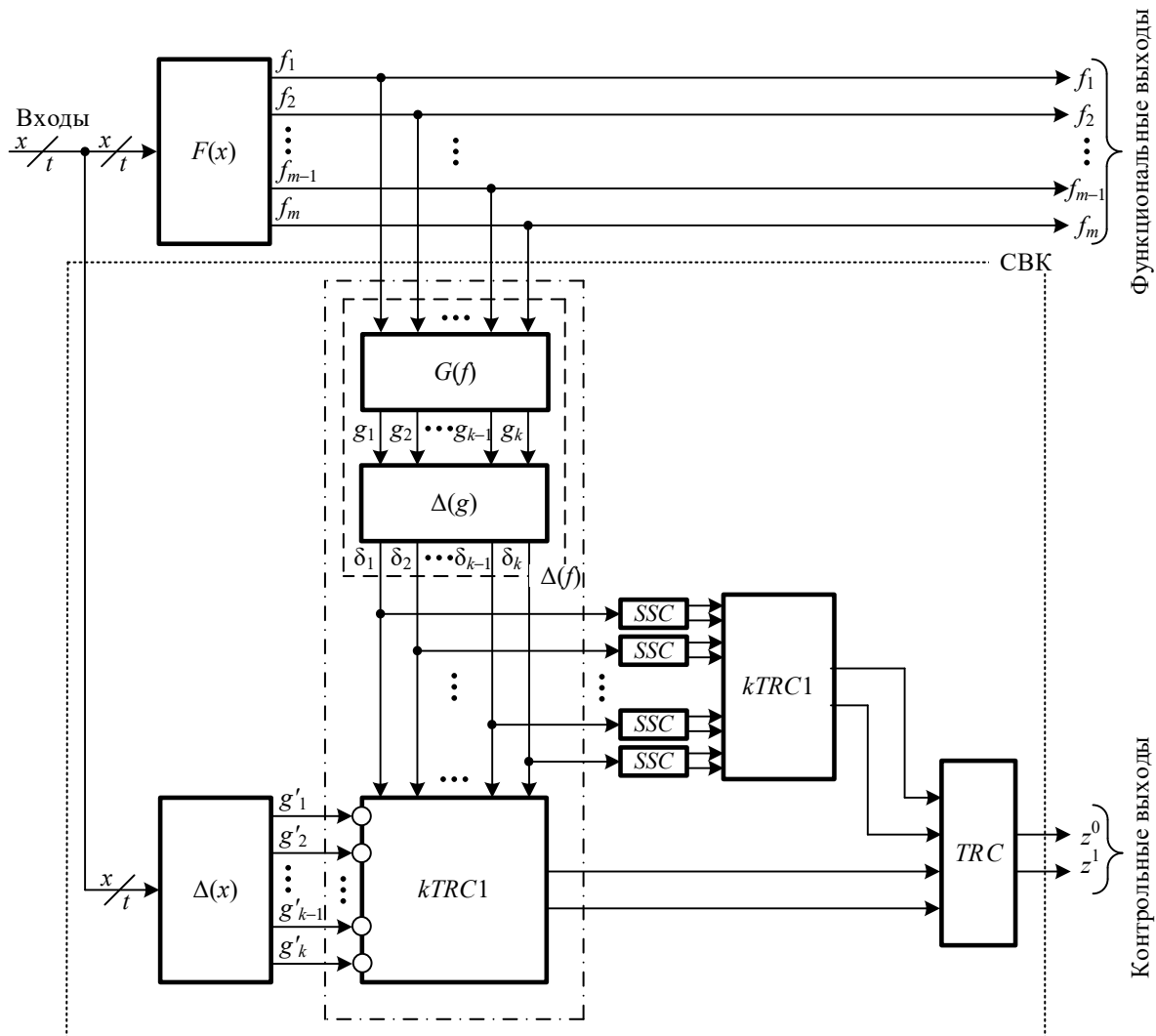


Рис. 12. Структура организации СВК с использованием двух диагностических признаков

Кодер H^M -кода на рис. 11 показан в виде устройства $G(f)$. δ -преобразователем является устройство $\Delta(g)$.

Схема устройства $\Delta(f)$ может быть оптимизирована за счет таких соображений:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= g_1 \oplus f_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_1 = f_3; \\ \delta_2 &= g_2 \oplus f_1 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_1; \\ \delta_3 &= g_3 = f_4. \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что функция вычисления разряда δ_1 Δ -кода равна значению функции f_3 . Из структуры устройства $\Delta(f)$ можно исключить два элемента сложения по модулю $M = 2$ (XOR). Оптимизированная схема δ -преобразователя изображена на рис. 11, б.

5. Обобщенная структура организации контроля вычислений

На рис. 12 представлена структура организации СВК с использованием двух диагностических признаков, в которой, по сравнению с классической структурой организации контроля по избыточным кодам [6, 10, 18], используется специальный δ -преобразователь и дополнительные устройства контроля самодвойственности сигналов. В отличие от структуры из [24], в СВК не применяется принцип логической коррекции сигналов.

Объект диагностирования $F(x)$ представляет собой исходное комбинационное устройство. Оно имеет входы $x_i, i = \overline{1, t}$ и снабжено выходами $f_j, j = \overline{1, m}$. Для контроля вычислений

использована СВК с пятью функциональными блоками. Блок $G(f)$ является кодером H^M -кода и преобразует сигналы с выходов устройства $F(x)$ в контрольные сигналы $g_l, l = \overline{1, k}$.

Выходы блока $G(f)$ подключены ко входам δ -преобразователя $\Delta(g)$, который, по сути, включает в себя необходимое для получения нечетного количества аргументов у контрольных функций H^M -кода элементов XOR и строится в соответствии с условиями теоремы 3. Отметим, что если используется H^M -код, удовлетворяющий условию (4), то δ -преобразователь из структуры СВК исключается, а выходы кодера напрямую используются для наблюдения сигналов и подключения контрольных устройств. Устройства $G(f)$ и $\Delta(g)$ образуют кодер $\Delta(f)$ специального Δ -кода. Блок $\Delta(x)$ является блоком контрольной логики и формирует проверочные символы Δ -кода по значениям входов $x_i, i = \overline{1, t}$. Остальные элементы в структуре СВК являются контрольными и предназначены для сравнения сигналов.

Устройство $kTRC1$ реализуется на основе пирамидального подключения $k - 1$ элементарного модуля сжатия парафазных сигналов (TRC). Устройство $kTRC1$ позволяет сжимать k парафазных сигнала в один. Одноименные сигналы от устройств $\Delta(x)$ и $\Delta(f)$ подаются на $kTRC1$. Так как каждый модуль TRC функционирует в парафазной логике, сигналы от одного из блоков ($\Delta(x)$ либо $\Delta(f)$) предварительно инвертируются. На схеме, приведенной на рис. 12, инвертированы сигналы от $\Delta(x)$. Сам блок $\Delta(x)$ может быть реализован таким образом, чтобы напрямую вычислялись функции $g_l, l = \overline{1, k}$.

Для контроля самодвойственности сигналов $\delta_l, l = \overline{1, k}$ на выходах блока $\Delta(g)$ устанавливается каскад тестеров самодвойственности (SSC). Данный каскад включает в себя k тестеров самодвойственности. Выходы каждого блока SSC подключаются к аналогичному уже описанному выше блоку $kTRC1$. Парафазные выходы от устройств $kTRC1$ подключаются к входам элементарного модуля TRC . Выходы этого элемента являются контрольными выходами z^0 и z^1 СВК.

Все элементы СВК, кроме $\Delta(x)$, являются типовыми. Сюда входят: один кодер $G(f)$ — он имеет единственную реализацию для

данного m , один преобразователь $\Delta(g)$ для случая $m \neq 2^k - 2, k \in \mathbb{N} (k > 1)$ (при $m = 2^k - 2, k \in \mathbb{N} (k > 1)$ преобразователь не требуется), k блоков SSC, k инверторов и $2k + 1$ модулей TRC . Блок $\Delta(x)$ синтезируется индивидуально для каждого устройства $F(x)$.

Для реализации преобразователя $\Delta(g)$ требуется не более k элементов XOR . На рис. 13 для примера представлена диаграмма числа элементов XOR в $\Delta(g)$ (это число обозначено через q) для различных значений $m \geq \{4, 5, \dots, 63\}$. Данная диаграмма наглядно демонстрирует простоту реализации преобразователя $\Delta(g)$. Для его построения требуется $q_{\min} = 0$ и $q_{\max} = k$ элементов XOR . В табл. 4 приведены для примера значения числа стандартных элементов в СВК для различных значений m и k .

Таблица 4. Количество типовых элементов в СВК для различных значений k

k	m	TRC	SSC	q_{\max}
3	4...7	7	3	3
4	8...15	9	4	4
5	16...31	11	5	5
6	32...63	13	6	6
7	64...127	15	7	7
8	128...255	17	8	8
9	256...511	19	9	9
10	512...1023	21	10	10
...
20	524288...1048575	41	20	20

Теорема 4. Количество типовых элементов в СВК с увеличением числа k растет линейно.

Доказательство. При увеличении значения k также увеличивается и число типовых (стандартных) элементов в СВК. Число элементов в $G(f)$ определяется числом m , а сам код является линейным. Число типовых контрольных элементов и элементов в $\Delta(g)$ в составе СВК максимально равно k . Число тестеров самодвойственности в СВК для произвольного значения k в точности равно k . Число элементов TRC , предназначенных для контроля принадлежности проверочных символов модифицированному коду Хэмминга, равно $k - 1$. Число элементов TRC в компараторе равно k , так как требуется сжатие $k + 1$ парафазного сигнала. Таким образом, общее число элементов TRC в

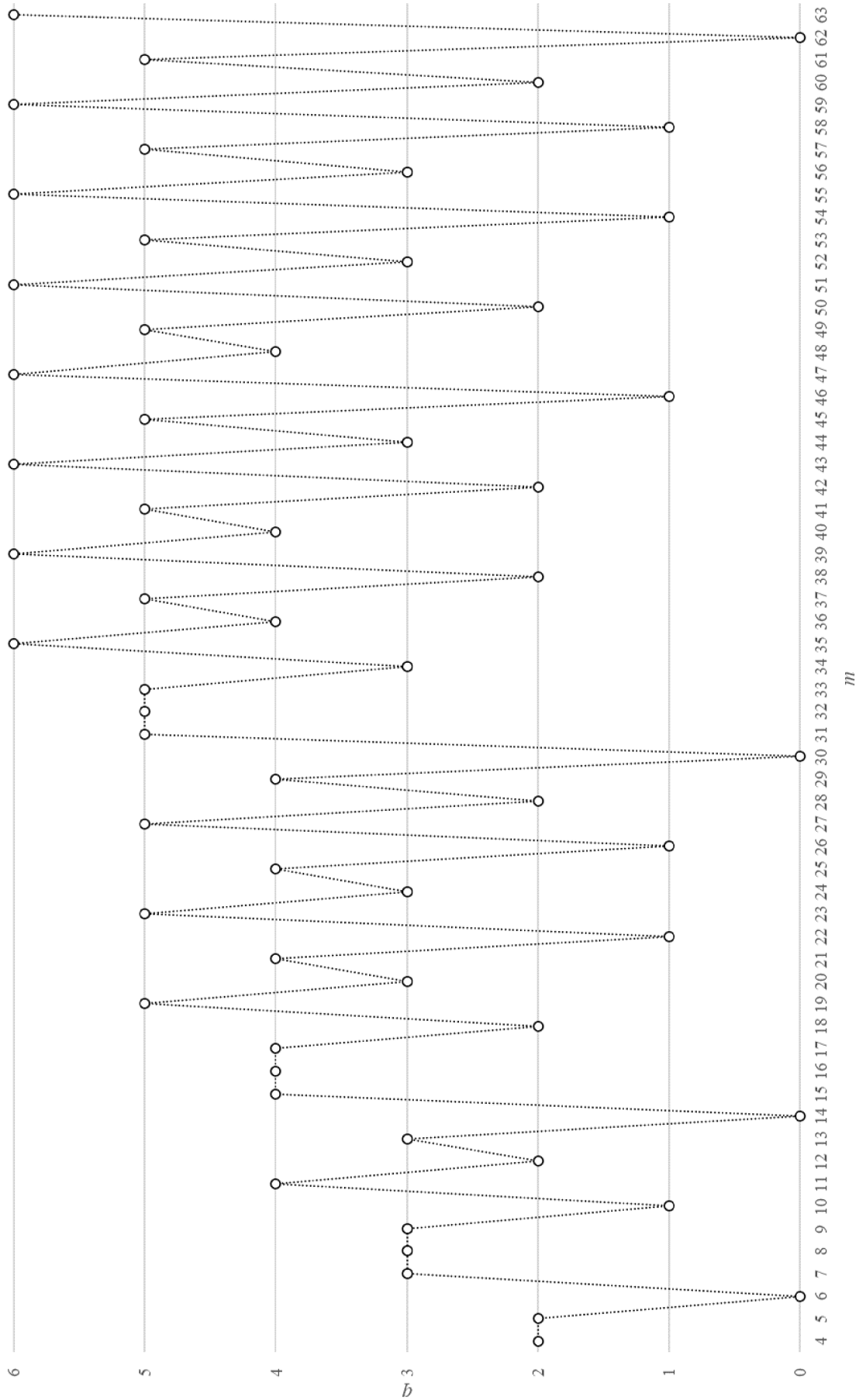


Рис. 13. Число q для различных значений m

СВК равно $2k - 1$. С увеличением k число элементов увеличивается линейно. **Доказательство завершено.**

Из формулировки теоремы 4 становится ясным, что показатели сложности СВК из-за стандартных элементов в ней увеличиваются незначительно. Также незначительно увеличивается и сложность реализации кодера и зависит от числа m информационных символов. Показатели структурной избыточности СВК в существенной степени зависят именно от показателей сложности реализации блока контрольной логики $G(x)$.

Заключение

Организация контроля вычислений на выходах цифровых устройств с использованием двух диагностических признаков — принадлежности контрольных сигналов разрядам модифицированных кодов Хэмминга и самодвойственности каждой функции, описывающей соответствующий проверочный символ, — позволяет улучшить показатели контролепригодности и увеличить число тестовых комбинаций по отношению к структуре контроля с использованием только одного из признаков. При этом усложнение СВК не является существенным. Усложнение же структур блоков $F(x)$ и $G(x)$ при получении самодвойственных аналогов также несущественно, однако зависит от исходных функций, описывающих их выходы, и от «близости» их к самодвойственным функциям. Особенности самодвойственных преобразований приводятся, например, в [30], где как раз анализируются показатели структурной избыточности самодвойственных устройств по сравнению с исходными устройствами и показано, что для ряда схем получаются самодвойственные структуры с низкой аппаратурной избыточностью. Например, для 7 тестовых схем из 27 (26 % выборки) получен результат усложнения не более 25 % от показателя сложности реализации исходных структур.

Также отметим, что кроме приведенной в настоящей статье «базовой» структуры на основе H^M -кода с $m = 6$ и $k = 3$ могут быть построены «базовые» структуры на основе H^M -кода с большими значениями k (для каждого k такая «базовая» структура одна). Их использование может оказаться целесообразным при большом

числе выходов исходного объекта. С ростом значения k значительно увеличивается кодированная скорость R . К примеру, для H^M -кодов, удовлетворяющих условию теоремы 2, последовательность кодовых скоростей такая: 0,66667; 0,77778; 0,85714; 0,91176. Это говорит о большей эффективности в применении H^M -кодов с большим числом информационных символов в части снижения структурной избыточности самопроверяемого цифрового устройства, чем при использовании кодов Хэмминга с малым числом информационных символов.

Несмотря на то, что для каждого числа k существует только один модифицированный код Хэмминга с самодвойственными функциями, описывающими проверочные символы, как показано в статье, всегда возможно использование δ -преобразования для получения фактически нового Δ -кода, проверочные символы которого будут описываться самодвойственными булевыми функциями. Применение δ -преобразования позволило предложить авторам обобщенную структуру организации СВК с использованием двух рассматриваемых диагностических признаков.

Организация СВК по двум диагностическим признакам не ведет к существенному усложнению контрольных устройств. Их число линейно увеличивается с увеличением числа контрольных разрядов H^M -кода (см. теорему 4). Поэтому структурная избыточность с ростом k возрастает несущественно. Избыточность СВК в наибольшей степени связана с показателями сложности технической реализации блока контрольной логики $\Delta(x)$ и зависит от числа входов и выходов, а также сложности реализуемых функций.

Контроль двух диагностических признаков позволяет повышать показатели контролепригодности и число тестовых комбинаций для каждой рассматриваемой неисправности. Это особенно важно в том случае, если СВК организуется для устройства, сигналы на входах которого меняются редко. Такая особенность присуща системам критического применения, например, в сфере атомной промышленности, космической отрасли, управления движением на железнодорожном транспорте и др. [19, 20].

Дальнейшие исследования в направлении изучения самопроверяемых цифровых

устройств, использующих как аппаратную, так и временную избыточность при реализации, могут быть направлены на изучение особенностей синтеза СВК для кодов Хэмминга и их модификаций с произвольным числом информационных символов, применения схем сжатия сигналов, а также использования метода логической коррекции (логического дополнения) при получении функций для вычисления проверочных символов, описанного в [35–39]. Интересными в части практических приложений могут оказаться вопросы изучения особенностей реализации самодвойственных цифровых устройств на современной программируемой элементной базе [44, 45].

Реализация самопроверяемых цифровых устройств, функционирующих в импульсном режиме, с контролем вычислений на основе двух диагностических признаков — перспективный подход к построению надежных и безопасных устройств и систем управления. ▲

Библиографический список

- Theeg G. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition / G. Theeg, S. Vlasenko. — Germany: Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p.
- Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов и др.; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017, 318 с.
- Efanov D. Fundamentals of Implementation of Safety Movement of Trains under Integration of Control Systems with Hardware for Railway Infrastructure Facilities Monitoring / D. Efanov, G. Osadchy, I. Aganov // Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021), Cracow, Poland, September 22–25, 2021. — Vol. 1. — Pp. 391–396. — DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660985.
- 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.
- Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
- Ярмолик В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. — Минск: Бестпринт, 2019. — 387 с.
- Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
- Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
- Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
- Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
- Ефанов Д. В. Отказоустойчивые структуры цифровых устройств на основе логического дополнения / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2021. — № 8. — С. 140–158. — DOI: 10.31857/S0005231021080079.
- Hamming R. W. Error Detecting and Correcting Codes / R. W. Hamming // Bell System Technical Journal. — 1950. — Iss. 29(2). — Pp. 147–160. — DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.
- Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. — 1961. — Vol. 4. — Iss. 1. — Pp. 68–73. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- Freiman C. V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels / C. V. Freiman // Information and Control. — 1962. — Vol. 5. — Iss. 1. — Pp. 64–71. — DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
- Sapozhnikov V. Weighted Sum Code Without Carries — is an Optimum Code with Detection of Any Double Errors in Data Vectors / V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov, D. Efanov et al. // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. — Pp. 134–141. — DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807686.
- Сапожников В. В. Взвешенный код с суммированием без операций переноса для задач технической диагностики дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2018. — Т. 61. — № 4. — С. 323–335. — DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-323-335.
- Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с.
- Droz A. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharченко, 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.
- Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. — М.: Наука, 2021. — 229 с.
- Ефанов Д. В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополне-

- ния до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников и др. // Труды Института системного программирования РАН. — 2019. — Т. 31. — № 1. — С. 115–132. — DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.
22. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov et al. // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. — Pp. 136–143. — DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 23. 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.
 24. 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.
 25. Ефанов Д. В. Самодвойственный контроль комбинационных схем с применением кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). — 2022. — № 3. — С. 113–122. — DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-113-122.
 26. Сагалович Ю. Л. Обнаружение неисправностей в схемной реализации системы монотонных булевых функций / Ю. Л. Сагалович, В. Ю. Соломенников // Проблемы передачи информации. — 1997. — Vol. 33. — Iss. 2. — Pp. 81–93.
 27. Matrosova A. Yu. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // VLSI Design. — 2000. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 47–58. — DOI: 10.1155/2000/46578.
 28. 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. — DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
 29. Аксенова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 10. — С. 144–153.
 30. 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.
 31. 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.
 32. 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.
 33. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб.: Энергоатомиздат (Санкт-Петербургское отделение), 2001. — 331 с.
 34. Сапожников В. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. — СПб.: Элмор, 2006. — 220 с.
 35. 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.
 36. 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.
 37. 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.
 38. Сапожников В. В. Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 57–64.
 39. Сапожников В. В. Способ построения системы функционального контроля на основе логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов и др. // Радиоэлектроника и информатика. — 2017. — № 3. — С. 15–22.
 40. Nikolos D. Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers / D. Nikolos // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1998. — Vol. 12. — Iss. 1–2. — Pp. 69–79. — DOI: 10.1023/A:1008281822966.
 41. Yongmao C. Control Operation Circuit System Design and Simulation Based on Multisim 13.0 / C. Yongmao, W. Jiayu, L. Tianyu // 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 18–20 December, 2020, Changsha, China. — DOI: 10.1109/ICISCE50968.2020.00457.
 42. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Лань, 2019. — 588 с.
 43. Багхдади А. А. А. Методы анализа и диагностирования цифровых устройств (аналитический обзор) / А. А. Багхдади, В. И. Хаханов, Е. И. Литвинова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматки. — 2014. — № 166. — С. 59–74.
 44. Пашуков А. В. Синтез устройств управления объектами напольной автоматизации железнодорожного транспорта на программируемых логических интегральных схемах / А. В. Пашуков // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). — 2021. — № 1. — С. 61–69. — DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69.
 45. Langmann R., Stiller M. The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems / R. Langmann, M. Stiller // Applied Sciences. — 2019. — Vol. 18. — Iss. 9. — Pp. 1–20. — DOI: 10.3390/app9183815.

Building Self-Checking Digital Devices on the Basis of Modified Hamming Codes with Self-Duality Control for Being Calculated Functions

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

Pogodina T. S., Student³. E-mail: pogodina-ts@mail.ru

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

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic 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

Abstract: There is considered the task for self-checking digital device synthesis which temporal redundancy and signal impulse representation are used in for to provide for error detection properties in calculations. There has been proposed the organization structure of self-checking combinational devices with built-in control circuits, the structure is based on the use of modified Hamming codes with self-dual functions, describing checking symbols. Building principles of modified Hamming codes are described. It has been proved that checking symbols of modified Hamming codes will be described by self-dual functions only in the cases of informational symbol number $m = 2^k - 2$, $k \in \mathbb{N}$ ($k > 1$), where k — checking symbol number. “Basic” structure of calculation control organization in combinational devices is given on the basis of modified Hamming codes with informational code number $m = 6$ which checking symbols are described by self-dual boolean functions. At calculation control by devices with output number of more than six, there’s pursued the decomposition of the set of outputs into subsets which each output for, control separate circuit is synthesized; control circuit outputs for various groups of outputs are united on the inputs of self-checking comparator for to get a one control signal. Thus, there has been proposed calculation control organization structure by two diagnostic features – the own of code words to modified Hamming codes and of being calculated functions, describing checking symbols, to self-dual Boolean function class. Such approach, as it’s shown in the article, allows to raise controllability indicators and to increase testing combination number in comparison with calculation control only on the basis of modified Hamming codes. Modelling results for self-dual combinational digital devices in Multisim interface are presented. The specificities of the realization of built-in control circuit blocks and their functioning are told. The application of proposed way of digital device organization is promising in the realization practice of reliable and safe control systems in the wide spectra of science and technology branches.

Keywords: self-checking device; self-dual digital devices; calculation control on the outputs of digital devices; temporal redundancy; self-dual control; calculation control by modified Hamming codes.

References

- Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. et al. *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: ucheb. posobie* [Reliability of systems of railway automation, telemechanics and communication: tutorial]. Moscow: FGBU DPO “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte” Publ., 2017, 318 p. (In Russian)
- Efanov D., Osadchy G., Aganov I. Fundamentals of Implementation of Safety Movement of Trains under Integration of Control Systems with Hardware for Railway Infrastructure Facilities Monitoring. Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021), Vol. 1, Cracow, Poland, September 22–25, 2021, pp. 391–396. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660985.
- Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
- Drozhd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G. et al. *Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem. Pod red. A. V. Drozda i V. S. Kharchenko* [Working diagnostics of safe information and control systems. Ed. A. V. Drozd and V. S. Kharchenko]. Khar'kov: Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. N. E. Zhukovskogo “KhAI” Publ., 2012, 614 p. (In Russian)
- Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryaemye ustroystva i otka-zoustoychivye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
- Yarmolik V. N. *Kontrol' i diagnostika vychislitel'nykh sistem* [Control and diagnostics of computer systems]. Minsk: “Bestprint”, 2019, 387 p. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Samoproveryaemye diskretnye ustroystva* [Self-checking discrete devices]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
- Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii* [Codes with summation for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniem* [Codes with summation for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. *Otkazoustoychivyye struktury tsifrovyykh ustroystv na osnove logicheskogo dopolneniya* [Fault-tolerant structures of digital devices based on logical complement]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2021. Iss. 8. Pp. 140–158. DOI: 10.31857/S0005231021080079. (In Russian)
- Hamming R. W. Error Detecting and Correcting Codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, Iss. 29(2), pp. 147–160. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.
- Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, Iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- Freiman C. V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels. *Information and Control*, 1962, vol. 5, Iss. 1, pp. 64–71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
- Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. et al. Weighted Sum Code Without Carries is an Optimum Code with Detection of Any Double Errors in Data Vectors. Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016, pp. 134–141. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807686.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Vzveshennyy kod s summirovaniem bez operatsiy perenos dlya zadach tekhnicheskoy diagnostiki diskretnykh sistem* [Weighted code with summation without transfer operations for problems of technical diagnostics of discrete systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroeniye* [Izvestia of higher educational institutions. Instrumentation]. 2018, vol. 61, Iss. 4.5, pp. 323–335. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-323-335. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv: monogra-fiya* [Hamming codes in

- functional control systems for logical devices: monograph]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2018, 151 p. (In Russian)
19. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions. Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'S 2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. DOI: 10.1109/EWDT'S.2011.6116606.
 20. Sapozhnikov V. V. *Sintez sistem upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh s iskluycheniem opasnykh otkazov* [Synthesis of train traffic control systems at railway stations with the exception of dangerous failures]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 229 s. (In Russian)
 21. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. et al. *Obnaruzhenie neispravnostey v kombinatsionnykh skhemakh na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnovesnykh kodov. Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Detection of faults in combinational circuits based on self-dual complement to equilibrium codes. Proceedings of the Institute for System Programming RAN]. 2019, vol. 31, Iss. 1.5, pp. 115–132. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8. (In Russian)
 22. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. I., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'S 2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDT'S.2019.8884398.
 23. 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 (EWDT'S 2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206. DOI: 10.1109/EWDT'S52692.2021.9581019.
 24. Efanov D. V., Pivovarov D. V. *Sintez samoproveryaemykh kombinatsionnykh ustroystv s kontrol'em vychisleniy po dvum diagnosticheskim parametram* [Synthesis of self-checking combinational devices with control of calculations by two diagnostic parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 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)
 25. Efanov D. V., Pogodina T. S. *Samodvoystvennyy kontrol' kombinatsionnykh skhem s primeneniem kodov Khemminga* [Self-dual control of combinational circuits using Hamming codes]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2022, Iss. 3, pp. 113–122. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-113-122. (In Russian)
 26. Sagalovich Yu. L., Solomennikov V. Yu. *Obnaruzhenie neispravnostey v skhemnoy realizatsii sistemy monotonykh bulevykh funktsiy* [Detection of faults in the circuit implementation of a system of monotone Boolean functions]. *Problemy p-redachi informatsii* [Problems of information transmission]. 1997, vol. 33, Iss. 2, pp. 81–93. (In Russian)
 27. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostaniin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design. 2000. Vol. 11. Issue 1. Pp. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578.
 28. Reynolds D. A., Meize G. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic. IEEE Transactions on Computers. 1978, vol. C-27, Iss. 12, pp. 1093–1098. DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
 29. Akseanova G. P. *Vosstanovlenie v dublirovannykh ustroystvakh metodom invertirovaniya dannykh* [Restoration in duplicated devices by data inversion]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1987, Iss. 10, pp. 144–153. (In Russian)
 30. Gessel' M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V. et al. *Obnaruzhenie neispravnostey v samoproveryaemykh kombinatsionnykh skhemakh s ispol'zovaniem svoystv samodvoystvennykh funktsiy* [Fault detection in self-checking combinational circuits using the properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1997, Iss. 12, pp. 193–200. (In Russian)
 31. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V. et al. *Samotestiruemaya struktura dlya funktsional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemakh* [Self-testing structure for functional failure detection in combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1999, Iss. 11, pp. 162–174. (In Russian)
 32. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V. et al. *Issledovanie svoystv samodvoystvennykh samoproveryaemykh mnogotaktnykh skhem* [Investigation of the properties of self-dual self-checking multi-cycle circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2001, Iss. 4, pp. 148–159. (In Russian)
 33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Gessel' M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva* [Self-dual discrete devices.]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ. (Sankt-Peterburgskoe otdelenie), 2001, 331 p. (In Russian)
 34. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Valiev R. Sh. *Sintez samodvoy-stvennykh diskretnykh sistem* [Synthesis of self-dual discrete systems]. St. Petersburg: Elmor Publ., 2006, 220 p. (In Russian)
 35. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. et al. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008, 184 p.
 36. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. et al. *Logicheskoe dopolneniye novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem* [Logical addition — a new method for controlling combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003, Iss. 1, pp. 167–176. (In Russian)
 37. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. et al. *Kontrol' kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya* [Control of combinational circuits by the method of logical addition]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2005, Iss. 8, pp. 161–172. (In Russian)
 38. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Postroenie samo-proveryaemykh struktur sistem funktsional'nogo kontrolya na osnove ravnovesnogo koda "2 iz 4"* [Construction of self-checking structures of functional control systems based on the equilibrium code "2 out of 4"]. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2017, Iss. 1, pp. 57–64. (In Russian)
 39. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. et al. *Sposob postroeniya sistemy funktsional'nogo kontrolya na osnove logicheskogo dopolneniya po ravnovesnomu kodu "1 iz 5"* [A method for constructing a functional control system based on the logical complement for the equilibrium code "1 out of 5"]. *Radioelektronika i informatika* [Radioelectronics and Informatics]. 2017, Iss. 3, pp. 15–22. (In Russian)
 40. Nikolos D. *Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers*. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998, vol. 12, Iss. 1–2, pp. 69–79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.
 41. Yongmao C., Jiayu W., Tianyu L. *Control Operation Circuit System Design and Simulation Based on Multisim 13.0*. 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 18–20 December, 2020, Changsha, China. DOI: 10.1109/ICISCE50968.2020.00457.
 42. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki* [Fundamentals of the theory of reliability and technical diagnostics]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2019, 588 p. (In Russian)
 43. Baghdadi A. A. A., Hahanov V. I., Litvinova E. I. *Metody analiza i di-agnostirovaniya tsifrovyykh ustroystv (analiticheskiy obzor)* [Methods of analysis and diagnostics of digital devices (analytical review)]. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i pribory avtomatiki* [Automated control systems and automation devices]. 2014, Iss. 166, pp. 59–74. (In Russian)
 44. Pashukov A. V. *Sintez ustroystv upravleniya ob'ektami napol'noy av-tomatizatsii zheleznodorozhnogo transporta na programmirovemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh* [Synthesis of devices for controlling objects of floor automation of railway transport on programmable logic integrated circuits]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2021, Iss. 1, pp. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. (In Russian)
 45. Langmann R., Stiller M. *The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems*. Applied Sciences, 2019, vol. 18, Iss. 9, pp. 1–20. DOI: 10.3390/app9183815.