



АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 1 • Том 7

Март, 2021

March, 2021



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

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»

ИЗДАТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский дом Т-ПРЕССА»
по договору № ЭОА45208 от 11.02.2020 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Вал. В. Сапожников,
доктор техн. наук, профессор,
академик Академии транспорта РФ
и Международной академии наук
высшей школы, заслуженный деятель науки РФ

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015,
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

Журнал включен в Перечень ведущих
рецензируемых научных
журналов и изданий 18 декабря 2017 года

ISSN 2412-9186

Индекс Роспечати 80525

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ

190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
кафедра «Автоматика и телемеханика
на железных дорогах»

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

190031, РФ, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки,
д. 117, лит. А, помещение 33Н, офис 351
+7(812) 457-8579, +7(921) 099-94-77
at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Перевод: *А. Н. Крышня*
Литературный редактор
и корректор: *Е. Г. Локтионова*
Выпускающий редактор: *Ю. В. Маркова*
Верстка: *А. А. Стуканова*

Электронное сопровождение: *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021

FOUNDER

Federal Railway Transport Agency
Federal State Budget
Educational Institution for Higher Education
«Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University» (PSTU)
«Automation and Remote Control
on Railways» department

PUBLISHER

Limited Liability Company “T-PRESSA Publishing House”,
under contract N ЭОА45208 dated February 11, 2020

EDITOR-IN-CHIEF

Valeriy V. Sapozhnikov,
D. Sc., Professor, Member of Academy
of Transport of Russia and International Higher
Education Academy of Sciences,
Honored Science Worker of Russia

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

Rospechat Index 80525

FOUNDER'S ADDRESS

190031, Russia, St. Petersburg,
Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote
control on Railways» department

PUBLISHER'S ADDRESS

190031, Russia, St. Petersburg,
Fontanka River emb., 117-A, prem. 33N, of. 351
+7(812) 457-8579, +7(921) 099-94-77
at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru

JOURNAL STAFF

English translation: *A. N. Kryshnia*
Editing and proofreading:
Eugenia G. Loktionova
Executive editor: *Julia V. Markova*
Layout: *Anna A. Stukanova*

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Валерий Сапожников

д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
главный редактор журнала
«Автоматика на транспорте»,
Санкт-Петербург, Россия

Константин Бочков

д-р техн. наук, профессор,
Белорусский государственный
университет транспорта,
Гомель, Белоруссия

Сергей Власенко

канд. техн. наук, доцент, «Сименс»,
Брауншвейг, Германия

Александр Дундуа

д-р наук, профессор,
Грузинский технический университет,
Тбилиси, Грузия

Марек Мезитис

д-р наук, доцент,
Рижский технический университет,
Рига, Латвия

Йохен Тринкауф

д-р наук, профессор,
Технический университет Дрездена,
Дрезден, Германия

Раймунд Убар

д-р техн. наук, академик
Эстонской академии наук,
Таллинский технический университет,
Таллин, Эстония

Владимир Хаханов

д-р техн. наук, профессор,
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники,
Харьков, Украина

Фуниан Ху

д-р наук, профессор,
Школа электротехники педагогического
университета Цзянсу,
Сюйчжоу, Китай

Христо Христов

д-р техн. наук, профессор,
Технический университет,
София, Болгария

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Никитин Александр Борисович

д-р техн. наук, профессор,
заместитель главного редактора журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Соколов Вадим Борисович

канд. техн. наук, доцент,
ответственный секретарь журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бестемьянов Петр Филимонович

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бушуев Сергей Валентинович

канд. техн. наук, доцент,
УрГУПС, Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич

д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Долгий Игорь Давидович

д-р техн. наук, профессор,
РГУПС, Ростов-на-Дону

Ефанов Дмитрий Викторович

д-р техн. наук, доцент,
РУТ, Москва

Кокурин Иосиф Михайлович

д-р техн. наук, профессор,
ИПТ РАН, Санкт-Петербург

Марков Дмитрий Спиридонович

канд. техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Наседкин Олег Андреевич

канд. техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Никищенков Сергей Алексеевич

д-р техн. наук, профессор,
СамГУПС, Самара

Пыркин Антон Александрович

д-р техн. наук, профессор,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Розенберг Ефим Наумович

д-р техн. наук, профессор,
НИИАС, Москва

Сапожников Владимир Владимирович

д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Шаманов Виктор Иннокентьевич

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Ходаковский Валентин Аветикович

д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Valery Sapozhnikov

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
Editor-in-chief of «Automation on Transport»,
St. Petersburg, Russia

Konstantin Bochkov

D. Sc., Professor, Belarusian State
University of Transport,
Gomel, Belarus

Sergey Vlasenko

Ph. D., Associate Professor,
Siemens AG,
Braunschweig, Germany

Alexander Dundua

D. Sc., Professor,
Georgian Technical University,
Tbilisi, Georgia

Marek Mezitis

Ph. D., Associate Professor,
Riga Technical University,
Riga, Latvia

Johann Trinckauf

Ph. D., Professor,
Dresden Technical University,
Dresden, Germany

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 Khrstov

D. Sc., Professor, Technical University,
Sofia, Bulgaria

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Nikitin

D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief of
«Automation on Transport», Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Vadim B. Sokolov

Ph. D., Associate professor, executive secretary
of «Automation on Transport»,
Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University, St. Petersburg

Leonid A. Baranov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Peter F. Bestemiyarov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Sergey V. Bushuev

Ph. D., Associate Professor, Ural State University
of Railway Transport, Ekaterinburg

Michael N. Vasilenko

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Igor D. Dolgiy

D. Sc., Professor, Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don

Dmitry V. Efanov

D. Sc., Associate Professor,
Russian University of Transport, Moscow

Iosif M. Kokurin

D. Sc., Professor, Institute of Transport Problems
of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg

Dmitry S. Markov

Ph. D., Associate professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Oleg A. Nasedkin

Ph. D., Associate Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Sergey A. Nikischenkov

D. Sc., Professor, Samara State
Transport University, Samara

Anton A. Pyrkin

D. Sc., Professor, IFMO University,
St. Petersburg

Efim N. Rozenberg

D. Sc., Professor, Scientific Research Institute
of Automation and Communication, Moscow

Vladimir VI. Sapozhnikov

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Victor I. Shamanov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Valentin A. Khodakovsky

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов

Повышение пропускной способности участка железной дороги
с применением технологии виртуальной сцепки 7

А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев

Оценка вероятности аварийной ситуации при вынужденной
остановке автомобиля на переезде..... 21

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. Н. Покусаев, А. Е. Чекмарев, В. С. Евсеев, М. Л. Овсянников, К. А. Кожемякина

Эксплуатация существующих железнодорожных путей необщего
пользования для организации пассажирского городского сообщения
в районе Бирюлево Восточное в Москве..... 39

ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

К. А. Иванова, Д. Н. Левин, М. В. Шкурин

Матрица базы данных для прогнозирования
нерегламентированных действий пилотов гражданской авиации
в особой ситуации при выполнении полетного задания 57

В. А. Смагин

Понятие обратного оптимального в смысле заполнения
квантования информации 75

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. В. Орлов, Д. В. Сперанский

Синтез цифровых схем для генерации заданных выходных
последовательностей..... 85

Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев

Динамические вопросники для организации систем поддержки
принятия решений, интегрированных в программные средства
диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной
автоматики 101

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов

Итерационные методы формирования наукометрических
показателей с учетом полного множества цитируемых работ 137

CONTENTS

TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- S. V. Bushuev, K. V. Gundyrev, N. S. Golochalov*
Increasing the capacity of the railway section with the use of virtual coupling technology 7
- A. N. Popov, S. Yu. Grishaev*
Assessment of emergency probability at the time of vehicle involuntary stop on the railway crossing 21
- O. N. Pokusaev, A. E. Chekmarev, V. S. Evseev, M. L. Ovsyannikov, K. A. Kozhemyakin*
Operation of existing railways of noncommon organization uses for organising of passenger city service in the district of Biryulevo Vostochnoe in Moscow 39

ELEKTRONIC SIMULATION

- V. A. Smagin*
Concept of return optimum in sense of filling of quantization of information 57
- K. A. Ivanova, D. N. Levin, M. V. Shkurin*
The matrix database for predicting unregulated actions of the flight crew in the inflight abnormal circumstances during the flight mission 75

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

- A. V. Gorelik, I. A. Zhuravlev, A. V. Orlov, D. V. Speranskiy*
Synthesis of digital circuits for generating generated output sequences 85
- D. V. Efanov, V. V. Khoroshev*
Dynamic questionnaires for organization of decision support systems integrated into software diagnosis and monitoring railway automation devices 101

DISCUSSION

- V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*
Iterative methods of scientific indicators formation with consideration to the full set of cited works 137

УДК 656.021.8

Бушуев С. В., канд. техн. наук

Гундырев К. В.

Голочалов Н. С.

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ

Цель статьи – определение мер, позволяющих эффективно применять перспективную технологию виртуальной сцепки для решения задачи повышения пропускной способности участка железной дороги. Для этого рассмотрена актуальность вопроса развития пропускной способности с помощью организационно-технических мер – совершенствования систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП). Приводятся основные виды систем ИРДП, изучается технология ведения соединенного поезда, при которой происходит физическое объединение поездов, а синхронизация движения осуществляется благодаря интеллектуальной системе автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами (ИСАВП-РТ), даются преимущества и недостатки данной технологии. Более подробно рассматривается технология движения в виртуальной сцепке, при которой два поезда движутся на минимально возможном друг от друга расстоянии благодаря обмену информацией по радиоканалу. Сравниваются возможные способы организации виртуальной сцепки: применение радиоблок-центров – технических средств, обрабатывающих информацию с локомотивов и выдающих сигналы управления, а также использование «виртуальной сцепки» при непосредственном обмене информацией между локомотивами. Приводятся ссылки на работы зарубежных авторов по организации CBTC (*Communication Based Train Control*). Рассматриваются технические (отсутствие контрольного режима, необходимость оснащения сети железных дорог радиосвязью) и технологические проблемы, возникающие при реализации данной технологии (сложность обработки возросшего числа прибывающих на станцию поездов). В заключении строится схема эффективного применения технологии виртуальной сцепки для решения задачи повышения пропускной способности участков железных дорог. Сделан вывод о том, что задача повышения пропускной способности требует комплексного подхода к решению с учетом всех технических и технологических особенностей участка.

Пропускная способность, провозная способность, интервальное регулирование, соединенный поезд, виртуальная сцепка, радиоканал

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20

Введение

Железная дорога – ключевой элемент транспортной системы РФ, обеспечивающий более 45 % грузооборота и 26 % пассажирооборота. Российские

железные дороги — неотъемлемая часть международных транспортных сетей. Одной из множества сформулированных в стратегии развития холдинга «РЖД» целей является формирование и продвижение комплексных транспортно-логистических услуг на евроазиатском пространстве за счет увеличения транзитных перевозок грузов на ключевых направлениях Восток—Запад и Север—Юг.

Тенденция увеличения грузооборота диктует необходимость повышения эффективности использования существующей инфраструктуры, освоения и применения передовых инновационных технологий и технических средств.

Максимальные объемы перевозок, осуществляемых на сети железных дорог, определяются такими параметрами, как пропускная и провозная способности. Поэтому актуальной задачей становится повышение пропускной и провозной способностей железнодорожных линий, особенно в условиях ремонта пути с закрытием одного из путей двухпутных участков.

На железных дорогах постоянно проводятся мероприятия по увеличению пропускной и провозной способности наиболее загруженных участков. Те, что призваны повышать пропускную способность, делятся на два основных типа: реконструктивные и организационно-технические. К реконструктивным относятся меры, требующие значительных капиталовложений и длительных сроков выполнения работ, например строительство дополнительных путей перегонов, реконструкции путевого развития станций. К организационно-техническим относятся мероприятия, позволяющие снять инфраструктурные ограничения путем совершенствования существующих средств и более эффективно применять их.

Цель статьи — рассмотреть возможные варианты повышения пропускной способности железной дороги через совершенствование систем интервального регулирования движения поездов. Особое внимание уделяется перспективной технологии виртуальной сцепки поездов, которая относится к классу СВТС (Communication Based Train Control). Движение поездов в таких системах управления осуществляется на базе радиоканала. Также будут определены преимущества и недостатки данной технологии, предложен возможный сценарий для перехода к ее эффективному применению.

1. Системы интервального регулирования движения поездов

Основные виды систем интервального регулирования:

- полуавтоматическая блокировка (ПАБ) — система интервального регулирования, при которой по перегону может двигаться только один поезд;
- автоблокировка (АБ) — система автоматического регулирования интервалов между поездами, попутно следующими по перегону;
- автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа как самостоятельное средство сигнализации и связи (АЛСО) — движение поездов по перегону осуществляется по показаниям локомотивных светофоров;

— многозначная локомотивная сигнализация (АЛС-ЕН) — межпоездным интервалом считается временной промежуток между прохождением поездами расчетной точки с максимально допустимой скоростью;

— автоблокировка с подвижными блок-участками — основана на принципе участков кодирования за хвостом поезда.

Существует технология организации движения соединенных поездов. Составы соединяются автосцепкой, а их тормозные магистрали объединяются в единую магистраль. Для управления локомотивами соединенных поездов применяется система ИСАВП-РТ, разработанная ООО «АВП ТЕХНОЛОГИЯ».

ИСАВП-РТ — интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами (распределенной тягой). Предназначена для автоматизированного согласованного управления грузовыми электровозами в соединенных поездах. Система учитывает профиль пути, постоянные и временные ограничения, продольные динамические усилия и выбирает энергооптимальный режим ведения поезда. Поезд, оборудованный аппаратурой ИСАВП-РТ, может управлять блоком хвостового вагона (БХВ) и системой управления тормозами поезда СУТП. Для осуществления радиосвязи применяется основной (150–160 МГц) и дублирующий (2,13 МГц) радиоканалы.

Для организации движения соединенных поездов прошла испытания система АВ-РТ, разработанная совместно специалистами АО «ВНИИЖТ», АО «Московский тормозной завод ТРАНСМАШ» и ООО «НПО САУТ». Отличительная особенность системы заключается в способности соразмерно снижать тягу локомотивов в соединенном поезде при снижении напряжения в контактной сети.

Сейчас из-за отсутствия на промежуточных станциях длинных путей операции по формированию соединенного поезда происходят с занятием горловины и перегона, что отрицательно сказывается на интенсивности отправления попутных поездов [1].

2. Технология виртуальной сцепки

В соответствии со стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» одним из перспективных направлений становится развитие технологий интервального регулирования движения поездов с использованием беспроводной передачи данных.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте ведет разработку виртуальной сцепки. Это технология интервального регулирования движения поездов, в которой расстояние между ведущим поездом и ведомым может изменяться в зависимости от профиля пути, скорости движения ведущего поезда, постоянных и временных ограничений. В отличие от технологии соеди-

ненного поезда, виртуальная сцепка не предполагает физического объединения составов, а значит и не требует наличия на станции длинных приемоотправочных путей [2].

Сравнение технологий представлено на рисунке 1.

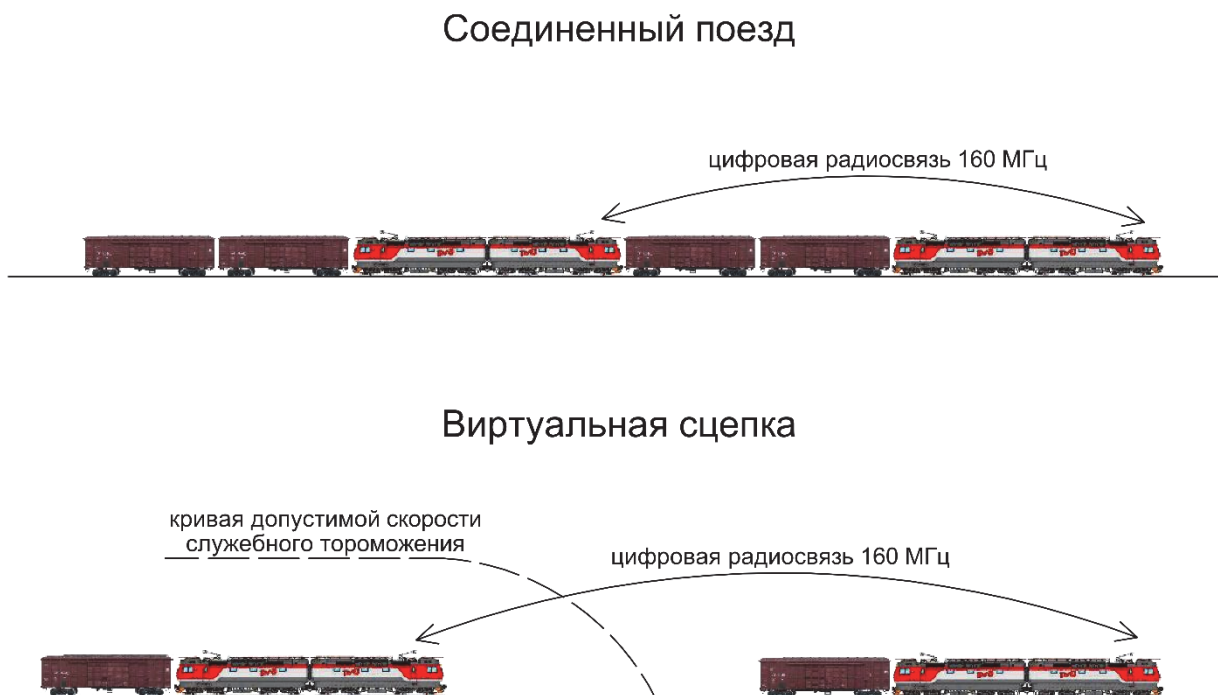


Рис. 1. Сравнение технологии соединенного поезда и виртуальной сцепки

По условиям безопасности движения расстояние между последним вагоном впереди идущего поезда и головным локомотивом следующего за ним поезда должно быть не меньше разницы длины служебного торможения идущего сзади поезда и длины экстренного торможения идущего впереди поезда [3]. Выполнение данного условия возможно только при динамическом расчете скорости движения поезда на основе необходимого объема и достоверности непрерывно получаемой информации о координате и скорости движения идущего впереди поезда [4]. Однако технология виртуальной сцепки в перспективе поможет перейти к гибкому управлению движением, позволяющим при необходимости сближать и отдалять поезда, которые следуют в виртуальной сцепке, обеспечивая наиболее удобный график движения.

3. Реализация технологии виртуальной сцепки

Существует два подхода к организации технологии виртуальной сцепки. Первый предполагает обмен данными непосредственно между локомотивами



Рис. 2. Виртуальная сцепка поездов с обменом данными между локомотивами

(рис. 2). Связь между ними осуществляется посредством радиоканала. Ведущий локомотив фактически управляет работой ведомого, отправляя ему режимы ведения поезда, а ведомый отправляет информацию о своем состоянии для корректирования режимов ведения. Синхронизация движения обеспечивается системой ИСАВП-РТ.

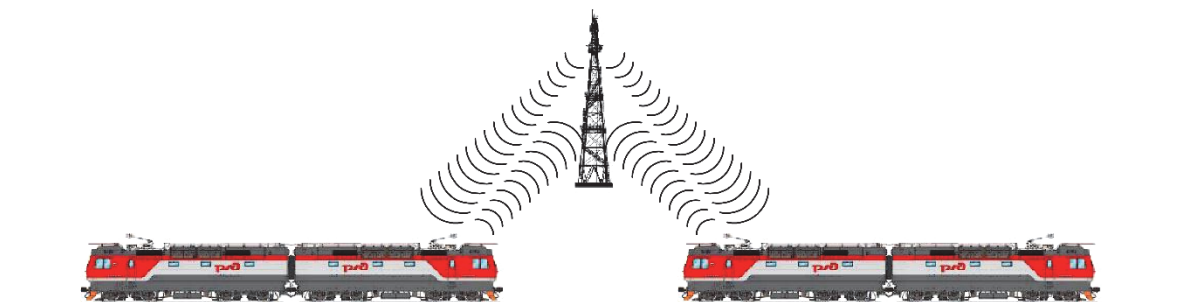


Рис. 3. Виртуальная сцепка с обменом данными через радиоблок-центр

Второй подход предусматривает обмен данными между локомотивами через радиоблок-центр (рис. 3).

Радиоблок-центр на основании информации от систем СЦБ и локомотивов формирует и передает команды управления поездом.

Технология виртуальной сцепки с обменом данными через радиоблок-центр активно тестируется на опытных участках железных дорог в составе Европейской системы управления железнодорожным транспортом ERTMS уровня 3 [5–9]. Вопросами инноваций железнодорожной отрасли, в т. ч. исследованиями в области применения технологии виртуальной сцепки, в Европе занимается исследовательская организация Shift2Rail в рамках программы Horizon 2020. Научные работы направлены на внедрение инновационных решений для построения Единой европейской железнодорожной сети (SERA – Single European Railway Area) [10–12].

В отечественных условиях наиболее эффективен вариант с непосредственным обменом данными между локомотивами, поскольку не требует строительства дополнительных радиоблок-центров на протяжении всей железнодо-

рожной линии. Технология прошла успешные испытания на сложном горно-перевальном участке Большой Луг – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги. Успешно отправлены два поезда в режиме виртуальной сцепки со станции Хабаровск-2 на станцию Находка-Восточная – Дальневосточной железной дороги. На этом участке запланировано пропускать по пять пар поездов в виртуальной сцепке каждые сутки.

4. Недостатки технологии виртуальной сцепки

Наряду с очевидными преимуществами виртуальной сцепки в виде повышения пропускной и провозной способностей существуют значительные проблемы для реализации технологии повсеместно. К ним относятся:

- отсутствие надежной альтернативы напольным устройствам безопасности (необходимость обеспечения контрольного режима);
- недостаточная оснащенность сети железных дорог цифровой радиосвязью;
- потребность в «умном локомотивном устройстве безопасности», которое будет принимать и передавать сигналы управления, определять местоположение поезда с высокой точностью, контролировать целостность состава [13, 14].

Кроме технических проблем есть и технологические. Рассмотрим ситуацию, в которой происходит увеличение темпа приема поездов на станцию. Наибольшее влияние оказывает ограничение количества принимаемых поездов по числу приемоотправочных путей. Допустим, время прибытия между поездами на станцию составляет 10 минут, а время обработки одного состава – 25 минут. Тогда приемоотправочные пути могут заполняться последовательно без каких-либо задержек. При сокращении интервала времени между поездами до 5 минут первые четыре поезда займут все приемоотправочные пути. А с пятого поезда возникают задержки, связанные с технологическими операциями по обработке поездов, прибывших на станцию (рис. 4) [15].

Это означает, что при решении задачи повышения пропускной способности отдельных участков необходимо концентрировать внимание не только на совершенствовании инфраструктуры, но и на том, как изменить технологию организации движения.

5. Схема применения технологии виртуальной сцепки

На основании всего вышесказанного можно построить схему применения технологии виртуальной сцепки, обеспечивающую повышение пропускной способности участка железных дорог (рис. 5).

Овальными рамками обозначены получаемые эффекты, а прямоугольными – действия для получения требуемого эффекта.

В нижней части рисунка 5 приводятся условия, без которых невозможна безопасная реализация технологии виртуальной сцепки.

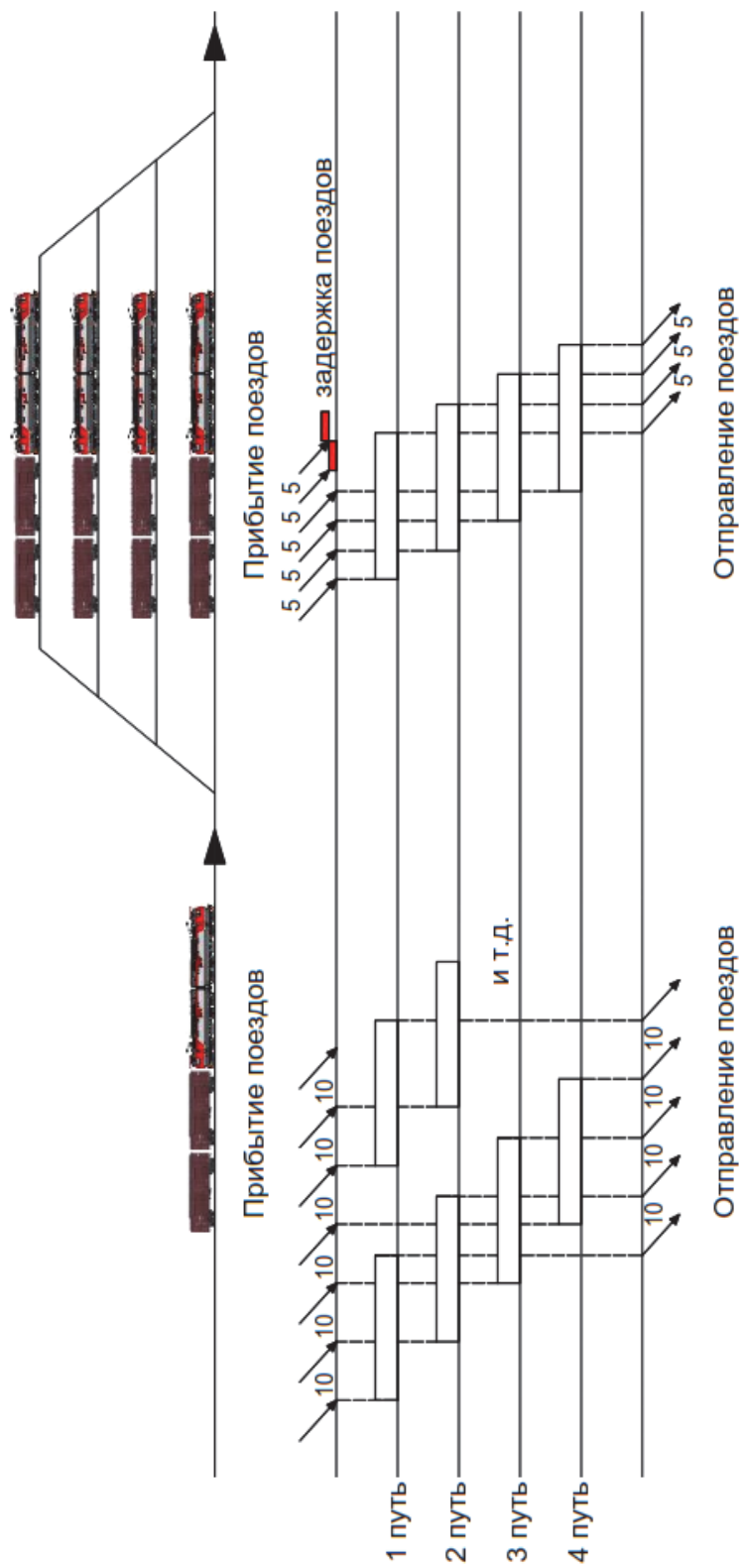


Рис. 4. Обработка поездов на станции

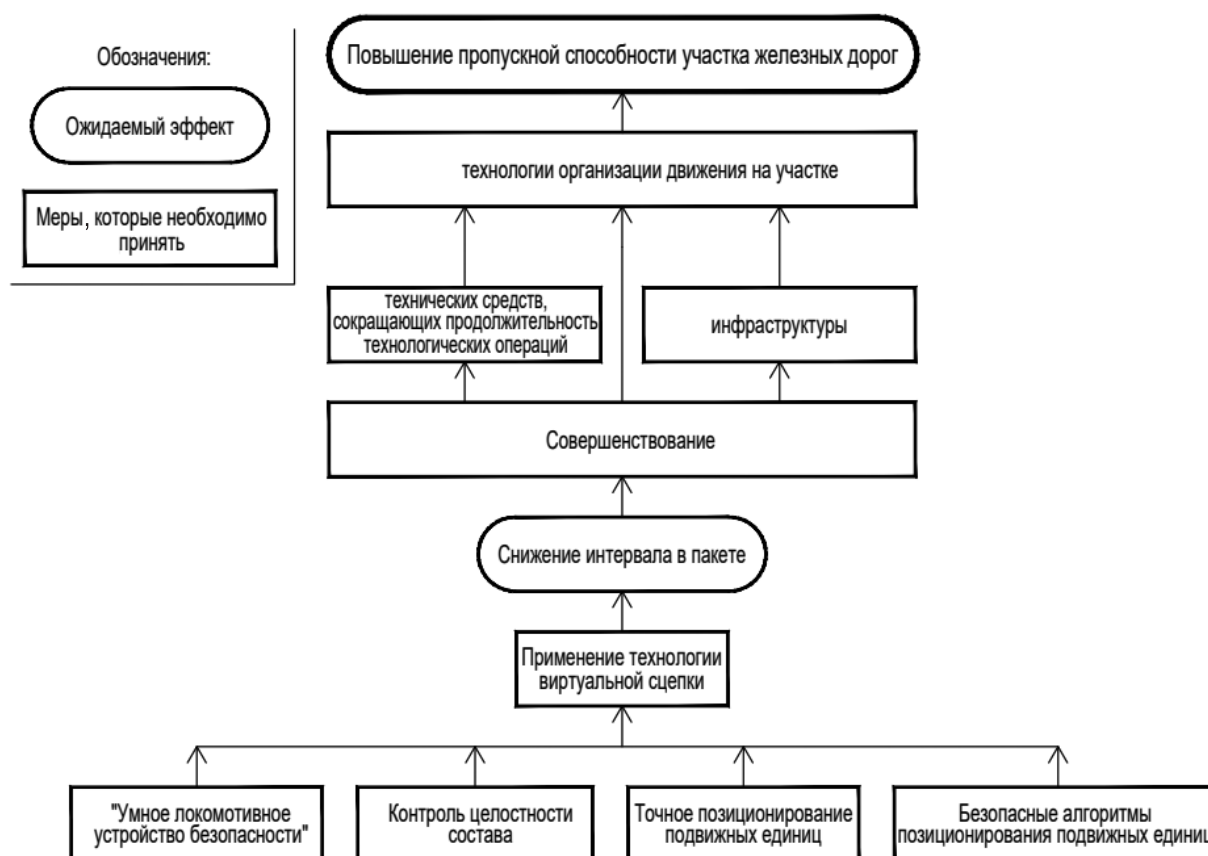


Рис. 5. Схема применения технологии виртуальной сцепки

Под «умным локомотивным устройством безопасности» понимается комплекс технических средств для двухстороннего взаимодействия с объектами инфраструктуры, операторами процессов и автоматического регулирования скорости поезда.

Важный фактор безопасности движения по радиоканалу без применения напольных устройств безопасности – непрерывный контроль целостности состава. Поэтому для поездов, двигающихся в виртуальной сцепке, обязательным условием станет наличие безопасной системы контроля целостности состава.

Следующее условие для перехода к технологии движения в виртуальной сцепке – точное позиционирование подвижных единиц. Точность расчетов допустимой скорости движения поезда в определенной точке пути зависит от точности определения координаты головного локомотива. Интенсивность отказов, приводящих к неправильному определению координаты головы поезда, должна быть не менее 10^{-9} ч⁻¹ [4]. С помощью одних только спутниковых навигационных систем пока не удастся добиться требуемой для решения задачи точности и надежности определения координат подвижного объекта. Комбинация спутниковых систем с другими методами позиционирования позволит обеспечить нужные характеристики.

Однако нужно быть уверенными и в безопасности полученных данных, поэтому необходимы алгоритмы и устройства, обеспечивающие безопасность вычисления, приема и передачи данных о местоположении и состоянии поездов, движущихся в виртуальной сцепке. Надежность передачи данных по радиоканалам должна соответствовать требованиям стандарта BS EN 50159:2010+A1:2020. Максимальная задержка при передаче данных между бортовым оборудованием разных локомотивов или бортовым оборудованием и радиоблок-центром должно быть менее 500 мс в 99 % случаев, а интенсивность отказов с потерей соединения — менее 10^{-2} ч⁻¹ [4].

Соблюдение всех условий позволит перейти к применению технологии виртуальной сцепки. Эффектом от ее применения станет сокращение интервала в пакете, поскольку интервал между поездами на перегоне будет уменьшен. Но увеличение количества поездов на перегоне может привести к тому, что инфраструктура станций участка железной дороги не сможет переработать поток поездов, прибывающих с минимальным интервалом.

Для получения дальнейшего эффекта от применения виртуальной сцепки необходимо решить возникающую проблему. Есть три основных направления решения:

- совершенствование технических средств, сокращающих продолжительность технологических операций, например, применение технологии автоматизированного закрепления состава;
- изменение технологии организации движения на участках — поиск резервов пропускной способности, переключение электрической централизации в режим автоблокировки, определение оптимальных вариантов движения поездов в виртуальной сцепке с учетом возможности их сближения и удаления друг от друга;
- улучшение инфраструктуры — реконструкция путевого развития станций, систем тягового энергоснабжения и других систем обеспечения движения поездов.

Перед внедрением технологии виртуальной сцепки требуется провести детальный анализ технического и технологического состояния участка. Для этого эффективно использовать методы имитационного моделирования [16–18].

Представленные варианты развития технологии виртуальной сцепки являются общими. Возможно, на некоторых участках и направлениях достаточно будет изменить технологию организации движения без привлечения значительных затрат на технические средства или инфраструктуру. На других придется провести дополнительную модернизацию технических средств, сокращающих продолжительность технологических операций.

Заключение

В статье рассмотрены возможные варианты решения задачи повышения пропускной способности участка железной дороги путем совершенствования

систем интервального регулирования, перечислены их основные виды. Обозначены преимущества и недостатки технологии ведения соединенного поезда. Такая технология наиболее эффективна при выполнении капитальных ремонтов на перегоне, к недостаткам можно отнести значительное время формирования состава и необходимость в длинных приемоотправочных путях. Более подробно описана технология виртуальной сцепки поездов. Выделены как технические недостатки (отсутствие альтернативы рельсовым цепям, необходимость оснащения сети железных дорог радиосвязью, потребность в «умном локомотивном устройстве»), так и технологические (сложность обработки возрастающего потока прибывающих на станцию поездов).

Предложена схема повышения пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки. Переход к виртуальной сцепке не дает значительного эффекта, т. к. возникают технологические и инфраструктурные ограничения, снижающие эффективность данной технологии. В схеме выделяются три пути снятия ограничений: совершенствование технических средств на станции, которые позволят ускорить процесс обработки прибывающих поездов; улучшение инфраструктуры и изменение технологии организации движения на участке (поиск оптимальных вариантов движения пакетов поездов с учетом гибкости технологии виртуальной сцепки).

Таким образом, представленная схема применения технологии виртуальной сцепки показывает: для решения задачи повышения пропускной способности недостаточно реализовать технологию виртуальной сцепки. Необходимо прорабатывать вопросы состояния инфраструктуры, переосмыслить технологию организации движения поездов, развивать технические средства, снижающие затраты времени на производимые людьми операции по обработке составов.

Из этого следует, что с учетом всех технических и технологических особенностей участка повышение пропускной способности требует комплексного подхода, а технология виртуальной сцепки является одним из множества элементов, над которыми предстоит работать для решения поставленной задачи.

Библиографический список

1. Климова Е. Е., Пилипушка Л. Е., Рябов В. С. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии // Транспортная инфраструктура сибирского региона : Материалы X Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 60–64.
2. Розенберг Е. Н., Коровин А. С. Глобальные тренды развития транспортных систем // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 12. – С. 14–19.
3. Баранов Л. А. Оценка интервала попутного следования метropоездов для систем безопасности на базе радиоканала // Мир транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–19.
4. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 223–239.

5. Pascoe R., Eichorn T. What is communication-based train control? – *Vehicular Technology Magazine, IEEE*. – Volume 4. – Issue 4. – 2009. – Pp. 16–21.
6. Cheptsov M., Tsykhmistro S., Boinik A., Bakhal I. Project NEAR – Network of European / Asian Rail Research Capacities (signalling systems). – *Збірник наукових праць ДонІЗ Т.* – 2013. – № 36. – Pp. 106–119.
7. Farooq H., Soler J. Radio communication for Communication-Based Train Control (CBTC) : A tutorial and survey, *IEEE Communications and Surveys & Tutorials*. – 2017.
8. Smith P., Majumdar A., Ochieng Y. An overview of lessons learnt from ERTMS implementation in European railways. – *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – № 2. – 2012. – Pp. 79–87.
9. Percoco M., Siciliano G., Baccelli O. An evaluation of the introduction of the Global Navigation Satellite System for regional railways : Case studies from Italy. – *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – № 7. – 2017. – Pp. 263–276.
10. Mitchell I., Goddard E., Montes F., Stanley P., Muttram R., Coenraad W., Pore J., Andrews S., Lochman L. ERTMS Level 4, Train Convoys or Virtual Coupling. – *Institution of railway signal engineers, IRSE news issue 219*. – 2016.
11. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards Railway Virtual Coupling. – *International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference*. – 2019.
12. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains. – *Springer International Publishing Switzerland*. – 2016. – Pp. 3–9.
13. Тильк И. Г., Ляной В. В., Гнисько Р. В. Альтернативы рельсовым цепям. Возможности и ограничения // *Автоматика, связь, информатика*. – 2019. – № 2. – С. 36–37.
14. Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути // *Автоматика на транспорте*. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 202–220.
15. Розенберг Е. Н., Абрамов А. А., Батраев В. В. Интервальное регулирование движения поездов // *Железнодорожный транспорт*. – 2017. – № 9. – С. 19–24.
16. Тимухина Е. Н., Кощеев А. А. Использование имитационного моделирования для определения оптимальных параметров и элементов транспортной системы // *Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования : Материалы IX Международной научно-практической конференции*. – 2017. – С. 222–224.
17. Козлов П. А., Тимухина Е. Н., Пермикин В. Ю., Окулов Н. Е. О пропускной способности станционных горловин // *Транспорт Урала*. – 2014. – № 2. – С. 47–49.
18. Колокольников В. С., Ковалёв И. А. Сравнение методов расчёта железнодорожных станций // *Инновационный транспорт*. – 2015. – № 1. – С. 80–82.

Sergey V. Bushuev, Ph. D.
Konstantin V. Gundyrev
Nikolay S. Golochalov

*Department of "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport",
Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg*

INCREASING THE CAPACITY OF THE RAILWAY SECTION WITH THE USE OF VIRTUAL COUPLING TECHNOLOGY

The purpose of the article is to determine the measures that make it possible to effectively apply the promising virtual coupling technology to solve the problem of increasing the capacity of a railway section. For this purpose, the relevance of the issue of capacity development with the help of organizational and technical measures i.e. improving the systems of collision avoidance of train traffic is considered. The main types of collision avoidance of train traffic systems are presented, the technology of driving a connected train is studied, in which the trains are physically combined, and the movement is synchronized thanks to the intelligent system of automated driving of trains of increased weight and length with locomotives distributed along the length. The advantages and disadvantages of this technology are given. In more detail, we consider the technology of movement in a virtual coupling, in which two trains move at the minimum possible distance from each other due to the exchange of information over the radio channel. The possible ways of organizing a virtual coupling are compared: the use of radio block centers which are a technical means that processes information from locomotives and issues control signals, as well as the use of a "virtual coupling" for the direct exchange of information between locomotives. References to the works of foreign authors on the organization of CBTC (Communication Based Train Control) are given. Technical problems (the lack of a control mode, the need to equip the railway network with radio communication) and technological problems that arise when implementing this technology (the complexity of processing the increased number of trains arriving at the station) are considered. In conclusion, the scheme of effective application of virtual coupling technology for solving the problem of increasing the capacity of railway sections is constructed. It is concluded that the task of increasing throughput requires a comprehensive approach to the solution, taking into account all the technical and technological features of the site.

Capacity; carrying capacity; interval regulation; connected train; virtual coupling; radio channel

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20

References

1. Klimova E. E., Pilipushka L. E., Ryabov V. S. (2019) Tekhnologiya «virtual'nogo stsepleniya» poyezdov kak instrument povysheniya propusknoy sposobnosti i propusknoy sposobnosti linii [Technology of «virtual coupling» of trains as a tool for increasing the carrying capacity and capacity of the line]. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona. Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the X International Scientific-Practical Conference], pp. 60–64. (In Russian)
2. Rozenberg E. N., Korovin A. S. (2018) Global'nyye trendy razvitiya transportnykh sistem [Global trends in the development of transport systems]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, connection, information technologies], no. 12, pp. 14–19. (In Russian)

3. Baranov L.A. (2015) Ocenka intervala poputnogo sledovaniya meropoezdov dlya sistem bezopasnosti na baze radiokanala [Evaluation of metro train succession time for safety systems based on radio channel]. *Mir transporta [World of transport and transportation]*, vol. 13, iss. 2, pp. 6–19. (In Russian)
4. Shamanov V.I. (2018) Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s cifrovymi radiokanalami [Systems interval regulation of traffic trains with digital radio channels]. *Avtomatika na transporte [Automation on transport]*, vol. 4, no. 2, pp. 223–239. (In Russian)
5. Pascoe R., Eichorn T. (2009) What is communication-based train control? *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 4, iss. 4, pp. 16–21.
6. Cheptsov M., Tsykhmistro S., Boinik A., Bakhal I. (2013) Project NEAR – Network of European/Asian Rail Research Capacities (signalling systems). *Collection of scientific works DonIST*, no. 36, pp. 106–119.
7. Farooq H., Soler J. (2017) *Radio communication for Communication-Based Train Control (CBTC): A tutorial and survey, IEEE Communications and Surveys & Tutorials*, no. 1, pp. 1–26.
8. Smith P., Majumdar A., Ochieng Y. (2012) An overview of lessons learnt from ERTMS implementation in European railways. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, no. 2, pp. 79–87.
9. Percoco M., Siciliano G., Baccelli O. (2017) An evaluation of the introduction of the Global Navigation Satellite System for regional railways: Case studies from Italy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, no. 7, pp. 263–276.
10. Mitchell I., Goddard E., Montes F., Stanley P., Muttram R., Coenraad W., Pore J., Andrews S., Lochman L. (2016) ERTMS Level 4, Train Convoys or Virtual Coupling. *Institution of railway signal engineers, IRSE news*, iss. 219, pp. 1–3.
11. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. (2018) Towards Railway Virtual Coupling. *International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference*, no. 1, pp. 1–6.
12. Goikoetxea J. (2016) *Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains*. Springer International Publishing Switzerland, pp. 3–9.
13. Tilk I. G., Lyanoy V.V., Gnitko R. V. (2019) Al'ternativy rel'sovym tsepyam. Vozmozhnosti i ogranicheniya [Alternatives of rail circuits. Opportunities and limitations]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, connection, information technologies]*, no. 2, pp. 36–27. (In Russian)
14. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. (2019) Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sredstv kontrolya svobodnosti uchastkov puti [Evaluation of the economic efficiency of track occupation monitoring means]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, vol. 5, no. 2, pp. 202–220. (In Russian)
15. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. (2017) Interval'noe regulirovaniye dvizheniya poyezdov [The interval regulation of movement of trains]. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, no. 9, pp. 19–24. (In Russian)
16. Timukhina E. N., Koscheev A. A. (2017) Ispol'zovaniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nykh parametrov i elementov transportnoy sistemy [Using simulation to determine the optimal parameters and elements of the transport system]. *Integratsiya obrazovatel'noy, nauchnoy i vospitatel'noy deyatel'nosti v organizatsiyakh obshchego i professional'nogo obrazovaniya. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Integration of educational, scientific and educational activities in organizations of general and vocational education. Materials of the IX International Scientific-Practical Conference]*, pp. 222–224. (In Russian)

17. Kozlov P.A., Timukhina E.N., Permikin V.Y., Okulov N.E. (2014) O propusknoy sposobnosti stantsionnykh gorlovin [Station neck capacity]. *Transport of the Ural [Transport Urala]*, no. 2, pp. 47–49. (In Russian)
18. Kolokolnikov V.S., Kovalyov I.A. (2015) Sravnenie sovremennykh metodov rascheta zheleznodorozhnykh stancij [Comparison of modern railway station design methods]. *Innovatsionnyy transport [Innovative transport]*, no. 1, pp. 80–82. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором Л. А. Барановым*

Поступила в редакцию 13.03.2020, принята к публикации 21.09.2020

БУШУЕВ Сергей Валентинович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», проректор по научной работе Уральского государственного университета путей сообщения
e-mail: SBushuev@usurt.ru

ГУНДЫРЕВ Константин Вячеславович — доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерные системы автоматизации» Уральского государственного университета путей сообщения
e-mail: KGundyrev@gmail.com

ГОЛОЧАЛОВ Николай Сергеевич — инженер научно-исследовательской лаборатории «Компьютерные системы автоматизации» Уральского государственного университета путей сообщения
e-mail: Nick_Golochalov@mail.ru

© Бушуев С. В., Гундырев К. В., Голочалов Н. С., 2021

УДК 656.216.2

Попов А. Н., канд. техн. наук**Гришаев С. Ю.***Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ ОСТАНОВКЕ АВТОМОБИЛЯ НА ПЕРЕЕЗДЕ

Аннотация. Интерес к проблеме разграничения потоков автомобильного и железнодорожного транспорта на переездах обусловлен повышенным риском транспортных происшествий и необходимостью ждать открытия переезда для автомобилей при проследовании поезда и связанных с этим ожиданием потерями. Со временем острота проблемы только нарастает – машин становится все больше, интенсивность и скорость движения увеличиваются, как и вес поездов. Наиболее эффективное средство для разграничения транспортных потоков на переездах – их разделение на разных уровнях за счет строительства эстакад. Существенным недостатком строительства эстакад, не позволяющим полностью решить задачу в приемлемые сроки, являются высокие капитальные затраты на строительство. Поэтому для большинства переездов, расположенных в одном уровне, основным средством управления транспортными потоками остается автоматическая переездная сигнализация (АПС), принципы действия которой остались практически без изменений с середины прошлого века, а условия ее работы существенно ухудшились.

По существующей методике расчета И-276-00 время извещения о приближении поезда определяется в зависимости от максимальной скорости движения поездов по переезду и количества железнодорожных путей, через которые проходит автомобильная дорога, а характеристики поезда и длина пути его торможения не учитываются. Ранее проведенные исследования показали, что при минимальной ширине переезда, установленной существующей методикой, остановка грузовых поездов перед переездом после его закрытия гарантируется только для скоростей движения не более 30 км/ч, остановка пассажирских поездов – не более 60 км/ч. При более высоких скоростях движения тормозного пути может не хватить, что приведет к столкновению в случае вынужденной остановки автотранспорта на переезде. Поезда, следующие через переезд, имеют различные характеристики: скорость движения и тормозной коэффициент. Поэтому требуется выполнить оценку вероятности столкновения при вынужденной остановке автотранспорта на переезде.

В работе исследована ситуация возникновения поломки автомобиля на железнодорожном переезде. По данным, полученным от бортовых комплексов локомотива, построены гистограммы распределений скорости и действительного тормозного коэффициента поездов, приближающихся к переезду. На основе статистических данных подтверждена гипотеза подчинения действительного тормозного коэффициента поездов теоретическому распределению Коши. Предложена статистическая модель распределения скорости поездов при приближении к переезду.

Дан метод оценки вероятности столкновения с поездом при поломке автомобиля на переезде. Получено численное значение оценки вероятности столкновения по методу, изложенному в работе. Обоснована необходимость разработки системы управления АПС по характеристикам приближающегося поезда.

Железнодорожный переезд, автоматическая переездная сигнализация, участок извещения, тормозной путь, время извещения, бортовые локомотивные комплексы

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-21-38

Введение

Основное средство безопасного разграничения транспортных потоков на железнодорожных переездах — автоматическая переездная сигнализация. Закрытие переезда осуществляется под воздействием колес поезда на участок извещения — граничащую с переездом рельсовую цепь. Замыкание рельсовой цепи колесами поезда приводит после некоторой выдержки времени к срабатыванию устройств автоматической переездной сигнализации, которая управляет состоянием переезда. Закрытие переезда ведет к остановке потока автотранспорта через него.

На железных дорогах РФ время извещения о приближении поезда определяется в зависимости от максимальной скорости движения поездов по переезду и количества железнодорожных путей, через которые проходит автомобильная дорога. В зарубежных странах дополнительно учитываются и другие факторы, например типы транспортных средств, использующих переезд [1].

Большим количеством аварий и тяжестью их последствий обусловлено обилие предложений по совершенствованию АПС и повышению безопасности на переездах. В их числе:

- автоматический контроль свободности переезда от автотранспорта и замена дежурного по переезду на удаленного оператора [2–4];
- организация дополнительных участков извещения или замена существующих решениями, основанными на счете осей [5–7];
- оповещение машинистов локомотива и водителей автотранспортных средств о ситуации на переездах [8, 9];
- уменьшение времени закрытого состояния переезда за счет управления закрытием в зависимости от координаты и скорости поезда, определенных по параметрам рельсовых цепей [10–14].

Устройство и отличия АПС для участков высокоскоростного и смешанного движения поездов рассмотрены в работах [15, 16].

Вопросам анализа безопасности переездов и принятия решений посвящены работы [17–27].

В опубликованных источниках не рассматриваются вопросы столкновений при вынужденной остановке автотранспорта в зоне переезда. Впервые задача исследования ситуаций поломки автотранспорта на железнодорожном переезде была сформулирована в работе [28].

Событие, заключающееся в остановке транспортного средства на переезде и невозможности его покинуть, имеет вероятность, которой нельзя пренебрегать. Такое случается регулярно и приводит к аварийным ситуациям (столкновениям). Однако в существующих технических средствах управления переездом и в алгоритмах их функционирования вероятность отказа автомобиля на переезде не учитывается. При обнаружении препятствия на переезде машинист начинает остановку поезда, применяя экстренное торможение. Если тормозной

путь поезда превышает оставшееся до переезда расстояние, происходит столкновение. Поэтому при управлении АПС необходимо учитывать тормозные пути поездов.

Поезда, следующие через переезд, имеют различные характеристики, от которых зависит длина тормозного пути: скорость движения и тормозной коэффициент. Длина участка извещения АПС фиксирована для каждого переезда. Столкновение возможно, когда тормозной путь поезда превышает длину участка извещения. Требуется выполнить оценку вероятности столкновения при вынужденной остановке автотранспорта на переезде, что позволит определить необходимость совершенствования алгоритма работы АПС и выяснить очередность применения измененных алгоритмов для конкретных переездов.

1. Параметры поездов, следующих через переезд

Уравнение движения поезда, следующего через переезд, определяется известным выражением:

$$\frac{dv}{dt}(1 + \gamma) = f_T - w(v) - w(i) - \vartheta_p \varphi_{kp}(v), \quad (1)$$

где γ — коэффициент инерции вращающихся масс; f_T — удельная сила тяги локомотива; $\varphi_{kp}(v)$ — расчетный коэффициент трения тормозной колодки о бандаж; ϑ_p — расчетный тормозной коэффициент; $w(v)$ — удельная основная сила сопротивления движению; $w(i)$ — удельная сила сопротивления движению от уклонов и кривых.

Выражение для определения тормозного пути поезда находим из уравнения движения. В случае вынужденной остановки на переезде автотранспортного средства тормозной путь поезда можно рассматривать как случайную величину S_T с плотностью распределения $f(S_T)$, которая зависит от параметров самого поезда. Получить значения тормозных путей поездов на каждом переезде экспериментальным путем не представляется возможным. Поэтому предлагается определить тормозные пути по известной модели торможения поезда, подставляя в нее значения экспериментально измеренных параметров движения поезда на переезде. Тормозной путь поезда связан с его параметрами известной функциональной зависимостью (1) при выключенной тяге локомотива:

$$S_T = \frac{1}{\zeta} \int_0^{v_H} \frac{v dv}{\vartheta_p \varphi_{kp}(v) + w(v) + w(s)}.$$

Тогда случайная величина S_T может быть оценена как функция случайных аргументов от начальной скорости торможения v_H и действительного тормозного коэффициента ϑ_d :

$$\widehat{S}_T = \varphi(v_n, \vartheta_d). \quad (2)$$

Значения действительного тормозного коэффициента измеряются локомотивной аппаратурой САУТ, БЛОК и БЛОК-М, которая также позволяет узнать фактическое значение скорости в требуемых точках пути. Измеренные значения сохраняются в автоматизированной системе АСУТ-НБД2.

Для четырех переездов, расположенных на сети Свердловской железной дороги, по данным средств сбора и хранения регистраторов параметров движения АСУТ-НБД2 и системы передачи данных СВЛТР, имеется выборка скоростей движения при пересечении подвижным составом переезда и выборка действительных тормозных коэффициентов этих поездов. Получена выборка значений действительного тормозного коэффициента объемом 314 записей регистраторов параметров движения САУТ-ЦМ/485, САУТ-К, БЛОК и БЛОК-М за май 2020 года.

Расчетный тормозной коэффициент, характеризующий средства торможения поезда, представляет собой отношение суммы сил нажатия тормозных колодок ΣK к весу поезда (сумме веса локомотива P и веса вагонов P):

$$\vartheta_p = \frac{\Sigma K}{(Q + P)}. \quad (3)$$

Средства торможения поезда должны обеспечивать безопасность при остановке на любой допустимой скорости движения. Считается, что для обеспечения безопасности расчетный тормозной коэффициент грузовых поездов и скоростей движения до 90 км/ч должен быть не менее 3,3, пассажирских со скоростями до 120 км/ч — не менее 6 [29, 30].

Значения действительного тормозного коэффициента, определенного по результатам поездок поездов, в отличие от расчетного будут иметь разброс, который обусловлен невозможностью точного определения силы нажатия всех тормозных колодок и веса всех вагонов при формировании поезда в условиях эксплуатации [31].

Определим закон распределения действительного тормозного коэффициента, что требует выполнения следующих этапов:

- выбора теоретического закона распределения;
- оценки параметров распределения по экспериментальным данным;
- вычисления теоретических значений частот и сравнения их с выборочными;
- анализа значения статистики χ^2 и вывода о согласии экспериментальных данных с теоретическим законом распределения.

В литературе [31, 32] теоретически получено и обосновано выражение для определения плотности распределения фактических значений тормозного коэффициента:

$$p(\vartheta_{\text{сл}}) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\vartheta_{\text{сл}}}{a}\right)^2} \cdot \frac{B}{A} e^{\frac{B^2}{A} - C}, \quad (4)$$

где $\vartheta_{\text{сл}}$ — случайное значение тормозного коэффициента, возможное в рассматриваемых условиях; a, A, B, C — параметры, зависящие от средних значений случайной силы нажатия тормозов и случайного веса поезда, а также от их дисперсий.

По выражению (4) можно предположить, что плотность распределения тормозного коэффициента подчиняется закону Коши. Верность данного предположения подтверждается тем, что отношение независимых нормально распределенных случайных величин (в данном случае это сумма сил нажатий тормозных колодок и вес поезда) распределено по закону Коши [33–35].

Случайная величина, подчиняющаяся закону Коши, имеет плотность распределения:

$$p(\vartheta_{\text{д}}) = \frac{1}{\sqrt{\pi b}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{(\vartheta_{\text{д}} - a)}{b}\right)^2}, \quad (5)$$

где a — параметр положения; b — параметр масштаба, характеризующий центр распределения.

Распределение Коши не имеет моментов вследствие расходимости определяющих их интегралов, относится к классу распределений с тяжелыми хвостами — распределений, для которых не выполнен закон больших чисел. Это означает, что существуют выборочные оценки для среднего значения и среднего квадратического отклонения, однако они ни к чему не сходятся и не имеют функциональной связи с параметрами распределения.

Оценка параметров на основе экспериментальных данных представляет трудности.

Наиболее точные оценки можно получить методом максимального правдоподобия и поисковыми алгоритмами [36.]. Для получения оценок указанным методом целесообразно использовать компьютерные программы

По имеющейся выборке значений действительного тормозного коэффициента получены оценки: $\hat{a} = 3,3$, $\hat{b} = 0,14$.

Проверим гипотезу о том, что распределение значений действительного тормозного коэффициента подчиняется закону Коши, с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 . По формуле Стерджесса оптимальное количество интервалов группировки данных равно 9. Сведем в таблицу 1 статистический ряд, построенный по выборочным значениям.

Таблица 1. Статистический ряд распределения тормозного коэффициента

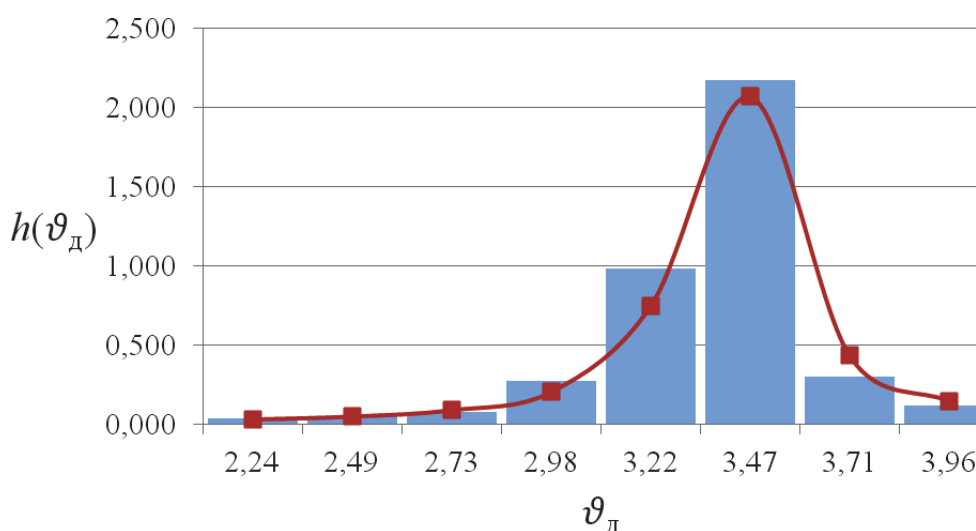
$\vartheta_{д_i}$	2,12	2,37	2,61	2,86	3,1	3,34	3,59	3,83	4,08
ω_i	0,01	0,013	0,019	0,067	0,24	0,53	0,073	0,029	0,019
h_i	0,039	0,052	0,078	0,274	0,980	2,170	0,301	0,118	0,078
$p(\vartheta_{д_i})$	0,032	0,050	0,090	0,205	0,784	2,067	0,433	0,147	0,071

$\vartheta_{д_i}$ — середины частотных интервалов; ω_i — относительные частоты; h_i — плотность относительных частот; $p(\vartheta_{д_i})$ — значения плотности теоретического распределения в серединах частотных интервалов.

Наблюдаемое значение статистики $\chi^2_{\text{набл}} = 11,5$. Критическое значение статистики $\chi^2_{\text{критич}} = 15,5$ на уровне значимости 0,05 и числа степеней свободы гипотеза о подчинении выборочных значений действительного тормозного коэффициента не отвергается.

Гистограмма распределения действительного тормозного коэффициента и закон распределения Коши приведены на рисунке 1.

Скорость движения поезда определяется принимаемыми кодовыми комбинациями локомотивной сигнализации: «З» разрешает движение с максимальной установленной на участке скоростью, «Ж» разрешает движение поезда со скоростью не более 60 км/ч, «КЖ» требует выполнить остановку перед следующим напольным светофором. Машинист стремится вести поезд со скоростью, близкой к наибольшей разрешенной для текущей кодовой комбинации. Поэтому можно предположить полимодальное распределение плотности вероятности

**Рис. 1.** Гистограмма плотности распределения действительного тормозного коэффициента и теоретической плотности распределения

скорости поезда на переезде с количеством мод равным трем — по числу кодовых комбинаций. Каждая из мод подчиняется нормальному закону:

$$p(v_H) = \frac{P(3)}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_3 - m_3)^2}{2\sigma_3^2}} + \frac{P(Ж)}{\sigma_{Ж} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_{Ж} - m_{Ж})^2}{2\sigma_{Ж}^2}} + \frac{P(КЖ)}{\sigma_{КЖ} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v_{КЖ} - m_{КЖ})^2}{2\sigma_{КЖ}^2}}, \quad (6)$$

где $P(3)$, $P(Ж)$, $P(КЖ)$ — вероятности приема кодов «3», «Ж» и «КЖ» соответственно.

Модель вероятностной смеси в соответствии с (6) представлена на рисунке 2.

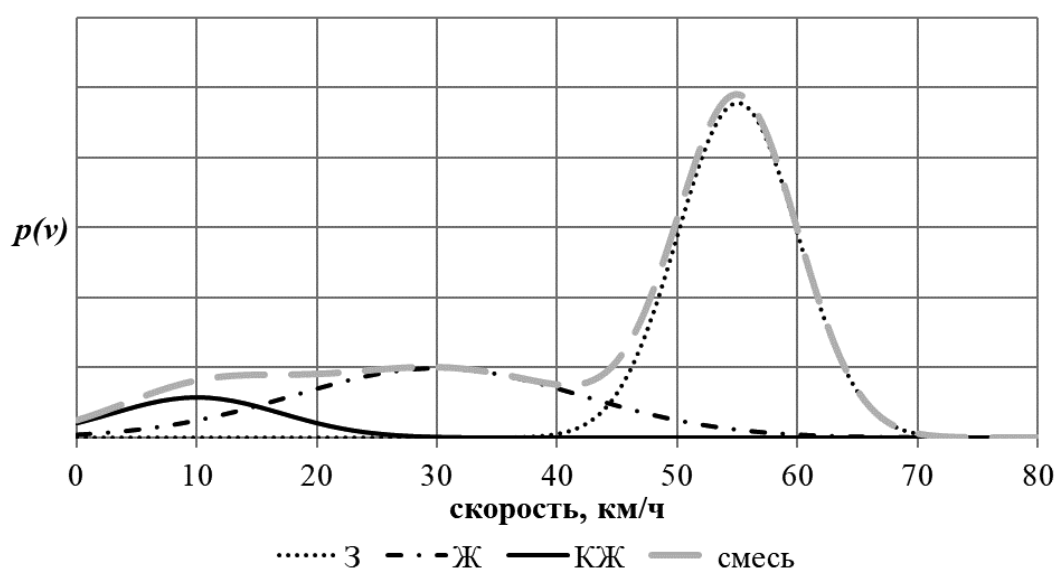


Рис. 2. Модель вероятностной смеси распределения скоростей

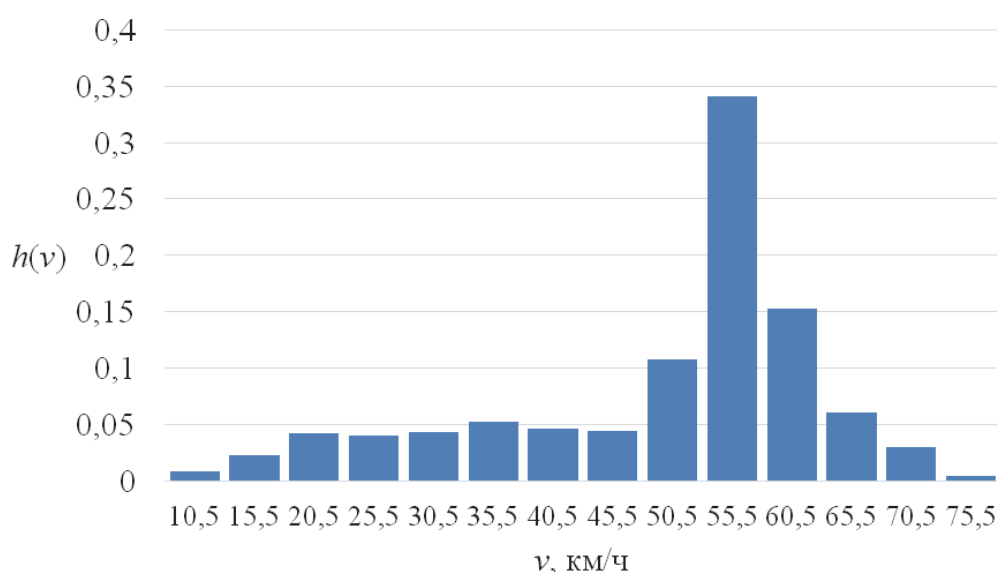


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости поездов перед переездом

Вид гистограммы распределения скоростей, построенной по выборочным значениям (рис. 3), соответствует предполагаемому в (6).

На рассматриваемых переездах 90 % поездов движется со скоростями до 65 км/ч. При этом участки извещения рассчитаны на скорости более 100 км/ч.

2. Определение вероятности столкновения на переезде при поломке автомобиля

Решим задачу нахождения вероятности безаварийной остановки поезда перед переездом по известным выборкам значений скорости и тормозных коэффициентов. Для этого требуется разработать соответствующий метод.

Обозначим $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_N\}$ – выборку из N элементов скоростей поездов перед переездом, а $\theta = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_j, \dots, \vartheta_M\}$ – выборку из M элементов значений тормозного коэффициента.

Для каждой пары выборочных значений (v_i, ϑ_j) вычислим:

$$s_{ij} = \frac{1}{\zeta} \int_0^{v_i} \frac{v dv}{\vartheta_j \varphi(v) + w(v)}. \quad (7)$$

Для определения S_{ij} используются численные методы: интервалов времени и интервалов скорости [29, 30].

Наиболее распространенным при практическом использовании является аналитический метод расчета длины тормозного пути, опирающийся на численное интегрирование уравнения движения поезда по интервалам скорости. Тормозной путь разбивается на два участка: подготовительный $S_{\text{тп}}$ и действительный $S_{\text{тд}}$. Считается, что при прохождении $S_{\text{тп}}$ тормоза не работают, а на участке $S_{\text{тд}}$ они действуют с максимальным и неизменным давлением в тормозных цилиндрах (ТЦ), возникающим скачкообразно. Расчет длины тормозного пути по интервалам скорости выполняется по формуле:

$$S_{\text{т}} = S_{\text{тп}} + S_{\text{тд}} = \frac{v_0 t_n}{3,6} + \sum \frac{500(v_{\text{н}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{[w_{\text{ox}} + w_{\text{с}} + 1000\vartheta_p \varphi_{\text{кр}}]},$$

где $v_{\text{н}}$ – начальное значение скорости; $v_{\text{к}}$ – значение, до которого следует снизить скорость; w_{ox} – основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива; $w_{\text{с}} = 9,81i$ – дополнительное удельное сопротивление движению от спрямленного профиля и плана; i – уклон; $\varphi_{\text{кр}}$ – коэффициент трения колодок; ϑ_p – тормозной коэффициент поезда.

В связи с заменой реальной диаграммы наполнения ТЦ на скачкообразную метод интервалов скорости дает удовлетворительную точность расчетов при скоростях до 40 км/ч и на спусках до 20 ‰. Если остановка поезда происходит

до наполнения ТЦ, то замена диаграммы приводит к ошибке, заключающейся в увеличении тормозного пути.

Метод интегрирования уравнения движения поезда по интервалам времени более точен и универсален. В нем изменение скорости Δv в интервале Δt определяется по формуле:

$$\Delta v = -\frac{\zeta}{3600}(w_{\text{ок}} + w_{\text{с}} + 1000g_{\text{р}}\phi_{\text{кр}})\Delta t.$$

Зная скорость движения на предыдущем расчетном шаге $v_{\text{п}}$ и получив среднюю, находят приращение длины тормозного пути $\Delta S_{\text{т}}$ в интервале Δt :

$$\Delta S_{\text{т}} = \frac{v_{\text{п}} + \Delta v}{2} \cdot \frac{\Delta t}{3,6}.$$

Полученные таким образом отрезки $\Delta S_{\text{т}}$ суммируются для определения полного тормозного пути.

Выполнять остановку поезда перед еще не закрытым переездом не имеет смысла. Торможение следует осуществлять только после полного закрытия переезда, когда наблюдается вынужденная остановка автотранспорта и невозможность его перемещения. В расчетной модели необходимо уменьшить длину участка извещения на расстояние, которое проходит поезд за время закрытия переезда. Поскольку время закрытия переезда — величина постоянная, составляет 15 с, расстояние, проходимое поездом за это время, будет зависеть от скорости поезда. Поэтому целесообразно увеличить тормозной путь поезда на расстояние, которое он пройдет за время закрытия переезда.

Кроме того, требуется учитывать расстояние, проходимое поездом за время реакции машиниста на возникшую на переезде ситуацию $t_{\text{реак}}$.

С учетом приведенных выше замечаний определим значения k_{ij} , показывающие, во сколько раз тормозной путь поезда (с учетом времени на закрытие переезда) превышает длину участка извещения:

$$k_{ij} = \frac{1}{L_{\text{изв}}} \left[s_{ij} + \frac{v_i(t_{\text{закр}} + t_{\text{реак}})}{3,6} \right]. \quad (8)$$

По полученным значениям k_{ij} построим гистограмму $h(k_{ij})$, которая является оценкой плотности распределения вероятностей $f(K)$. Гистограмма представлена на рисунке 4.

Вероятность безаварийной остановки поезда перед переездом, занятым автотранспортом, можно определить по выражению:

$$P_{\text{ба}} = \int_{-\infty}^1 f(K)dk, \quad (9)$$

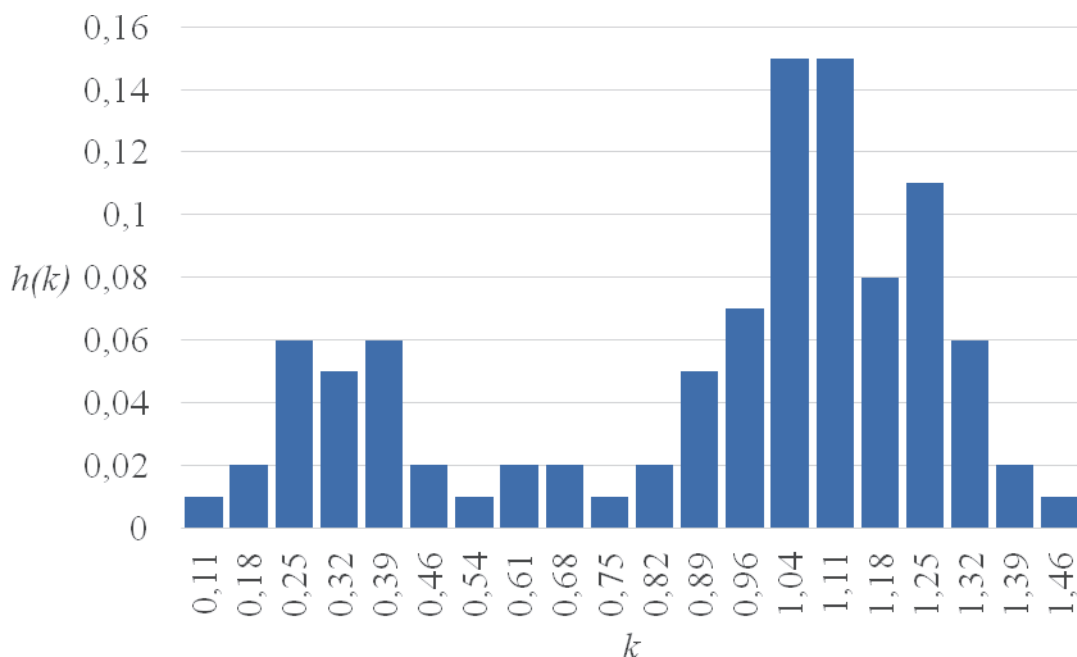


Рис. 4. Гистограмма распределения тормозного пути, нормированная к длине участка извещения

ее оценка может быть получена суммированием k_{ij} , со значениями меньше 1:

$$\widehat{P_{\text{ба}}} = \frac{\sum_i \sum_j k_{ij}}{ij}, k_{ij} < 1. \quad (10)$$

а вероятность столкновения поезда с вынужденно остановившимся транспортным средством на переезде будет определяться формулой:

$$P_c = 1 - P_{\text{ба}}. \quad (11)$$

Вычисления по предложенному методу показывают, что вероятность безаварийной остановки, рассчитанная в соответствии с (9), по имеющимся выборкам составляет $P_{\text{ба}} = 0,42$, а вероятность столкновения $P_c = 0,58$. Необходимо отметить, что при вычислении вероятностей не учитывалось время реакции машиниста. Было принято, что машинист применяет торможение сразу после поломки автомобиля на переезде.

Для решения проблемы предлагается реализовать систему управления переездной сигнализацией по характеристикам приближающегося поезда, что позволит обеспечить остановку поезда в случае поломки автотранспорта на переезде. Остановка поезда торможением выполняется только при условии занятости закрытого переезда автотранспортом или неисправности переездной сигнализации. В случае штатной работы АПС поезд проследует переезд без снижения скорости. Это дает основания полагать, что предлагаемая система

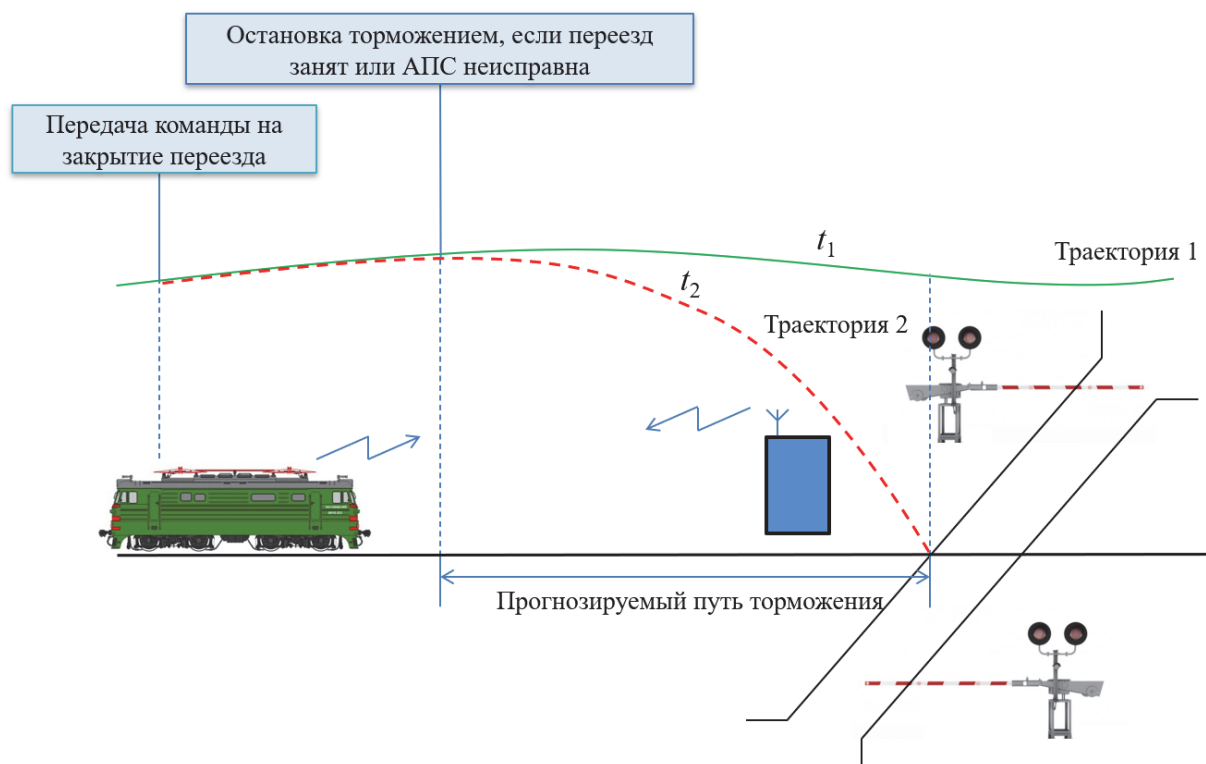


Рис. 5. Траектории приближения поезда к переезду

не увеличит время простоя автотранспорта у закрытого переезда. Приближение поезда к переезду может осуществляться по двум траекториям (рис. 5).

Поезд проследует свободный от автотранспорта переезд по траектории 1 за время t_1 . Остановка поезда по траектории 2 выполняется за время t_2 только при условии, что автотранспорт не смог покинуть переезд после опускания шлагбаумов. Очевидно, что время t_2 будет превышать t_1 , но движение поезда по траектории 1 через переезд будет выполняться гораздо чаще, чем остановка перед переездом по траектории 2. Поэтому расчет времени извещения целесообразно вести используя значение времени t_1 .

Столкновения, допускаемые на оборудованных традиционной системой АПС переездах, зачастую приводят к длительному перерыву в движении поездов. Остановка поезда по траектории 2 перед занятым переездом без столкновения (несмотря на увеличение времени проследования переезда в сравнении с движением по траектории 1) окажет меньшее влияние на пропускную способность железной дороги, чем существующие системы АПС.

Заключение

Решение существующей проблемы столкновений поездов с вынужденно остановившимся на переезде автотранспортом позволит сделать переезды

безопаснее. Однако исследователи уделяют этому вопросу слишком мало внимания. Проблема связана с превышением тормозных путей поездов над длиной участков извещения переездов. Получить значения тормозных путей поездов на каждом переезде экспериментальным путем не представляется возможным. Поэтому предлагается определить тормозные пути по известной модели торможения поезда, подставляя в нее значения экспериментально измеренных параметров движения поезда на переезде.

Статистические исследования данных, полученных от локомотивных бортовых комплексов, позволили подтвердить гипотезу о подчинении действительного тормозного коэффициента закону Коши. Предложена модель вероятностной смеси распределения скорости поездов при приближении к переезду, в соответствии с которой скорости имеют полимодальное распределение плотности вероятности с количеством мод равным трем — по числу кодовых комбинаций. Каждая из мод подчиняется нормальному закону.

Предложенный в работе метод позволил количественно оценить вероятность столкновения на переезде при вынужденной остановке автотранспорта. Для исследуемого переезда с участком извещения длиной 700 м вероятность столкновения составляет 0,58.

Вероятностью столкновения на переезде можно управлять, изменяя длину участка извещения. Зная распределения скорости и действительного тормозного коэффициента поездов, следующих через конкретный железнодорожный переезд, реально обеспечить вероятность столкновения любой малости, изменяя длину участка извещения.

Сделанные по результатам проведенной работы выводы свидетельствуют о целесообразности разработки и внедрения технических решений управления АПС по характеристикам приближающегося поезда.

В дальнейшем необходимо исследовать, как предлагаемый принцип работы АПС влияет на время простоя автотранспорта у закрытого шлагбаума, и сравнить с аналогичной характеристикой традиционных АПС.

Библиографический список

1. Larue G., Miska M., Qian G., Wullems C., Rodwell D., Chung E., Rakotonirainy A. Can road user delays at urban railway level crossings be reduced? Evaluation of potential treatments through traffic simulation. Case Studies on Transport Policy. – Volume 8. – Issue 3. – September 2020. – Pp. 860–869.
2. Гуревич В. Л., Щиголев С. А. Устройства заграждения на переездах без дежурного работника//Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 5. – С. 4–7.
3. Чеблаков В. А., Катаев М. Н. Новые системы переездной сигнализации//Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 5–7.
4. Долгий А. И., Хатламаджиян А. Е., Шаповалов В. В., Кучеренко П. А., Шапекин А. Е. Система автоматизированного удаленного управления переездами//Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 4–7.

5. Тильк И. Г. Применение устройств счета осей в переездной сигнализации//И. Г. Тильк, Б. С. Сергеев//Транспорт Урала. – 2006. – № 2 (9). – С. 37–41.
6. Щиголев С. А. Автоматическая переездная сигнализация на счетчиках осей/С. А. Щиголев, С. А. Татиевский//Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 12. – С. 57–58.
7. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2010. – 167 с.
8. Ефанов Д. В. Сервис прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда/Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий//Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 4 (77). – С. 31–36.
9. Ефанов Д. В. Комплексный учет параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах/Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников, В. В. Хорошев//Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – Т. 4. – С. 167–194.
10. Герус В. Л. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий/В. Л. Герус, Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова//Вестник Мордовского университета. – 2018. – № 2. – Т. 28. – С. 191–207.
11. Тарасов Е. М. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации/Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, В. Л. Герус//Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6 (54). – С. 58–61.
12. Масайтис Ю. Л. Переездной автоматический комплекс устройств/Ю. Л. Масайтис//Автоматика, связь, информатика. – 1997. – № 11. – С. 27.
13. Каменский В. Б. Организации безопасности движения на переездах – комплексную системную основу/В. Б. Каменский, Ю. А. Тюпкин, В. А. Поздняков//Железнодорожный транспорт. – 1999. – № 1. – С. 46–50.
14. Грачев Г. Н. Применение метода импульсного зондирования для организации переездной сигнализации/Г. Н. Грачев, М. Б. Гуменик//Автоматика, связь, информатика. – 1997. – № 11. – С. 28–30.
15. Никитин А. Б. Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях/А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев//Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2016. – № 2. – С. 206–214.
16. Кириллов А. Н. Модернизация схем автоматической переездной сигнализации//Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 9. – С. 30–31.
17. Система поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности железнодорожного переезда: Монография/А. И. Годяев. – Хабаровск: ДВГУПС, 2004. – 92 с.
18. Годяев А. И. Безопасность на переездах и способы снижения аварийности//Мир транспорта. – 2004. – № 4 (8). – Т. 2. – С. 80–85.
19. Abioye O. F., Dulebenets M. A., Pasha J. et al. Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA. Rail. Eng. Science 28, 251–274 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w>.
20. Chris De Gruyter & Graham Currie (2016) Rail-road crossing impacts: an international synthesis, Transport Reviews, 36:6, 793–815. DOI: 10.1080/01441647.2016.1188429.
21. Gitelman V., Hakkert A. S. The evaluation of road-rail crossing safety with limited accident statistics. Accident Analysis & Prevention. – Vol. 29. – Issue 2. – March 1997. – Pp. 171–179.
22. Borsos A., Gabor M., Koren C. (2016) Safety ranking of railway crossings in Hungary. Transp Res Procedia 14:2111–2120.
23. Liang C., Ghazel M., Cazier O. et al (2017) Risk analysis on level crossings using a causal Bayesian network based approach. Transp Res Procedia 25:2167–2181.

24. Davey J., Wallace A., Stenson N., Freeman J. The experiences and perceptions of heavy vehicle drivers and train drivers of dangers at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention*. – Vol. 40. – Issue 3. – May 2008. – Pp. 1217–1222.
25. Haleem K., Gan A. Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U. S. *Journal of Safety Research*. – Vol. 53. – 1 June 2015. – Pp. 23–29.
26. Larue G. S., Naweed A., Rodwell D. The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings. *Safety Science*. – Vol. 110. – December 2018. – Pp. 80–88.
27. Liang C., Ghazel M., Cazier O., El-Koursi E.-M. A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study. *Accident Analysis and Prevention*. – Vol. 108. – November 2017. – Pp. 181–188.
28. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом//Транспорт Урала. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – № 1 (64). – С. 39–42.
29. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 392 с.
30. Правила тяговых расчетов: распоряжение от 12.05.2016. № 867 р – Москва: ОАО «РЖД», 2016. – 514 с.
31. Теория электрической тяги/В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
32. Исаев И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. М.: Транспорт, 1970. – 182 с.
33. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
34. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников/А. И. Кобзарь – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.
35. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах/Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.
36. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография/Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

**Popov A. N., Ph. D.
Grishaev S. Yu.**

*Department of "Automation, Remote Control and Communication in Railway Transport",
Ural State University of Railways, Yekaterinburg*

ASSESSMENT OF EMERGENCY PROBABILITY AT THE TIME OF VEHICLE INVOLUNTARY STOP ON THE RAILWAY CROSSING

Interest in the problem of delimiting the flows of road and rail transport at crossings is due to the increased risk of traffic accidents and the need to wait for the opening of the crossing for cars when the train passes through and the losses associated with this waiting. Over time, the severity of the problem only grows – there are more and more cars, the intensity and speed of traffic increases, as does the weight of trains.

The most effective means of solving the problem of delimiting traffic flows at crossings is their separation at different levels through the construction of overpasses. A significant drawback of overpass

construction, which does not allow to completely solve the problem in an acceptable timeframe, is the high capital costs of construction. Therefore, for most crossings located at the same level, the main means of controlling traffic flows is the automatic crossing signaling (APS), the principles of which have remained practically unchanged since the middle of the last century, whereabouts the conditions for its operation have significantly deteriorated.

According to the existing method for calculating I-276-00, the time of notification of the train approaching is determined depending on the maximum speed of trains at the crossing and the number of railway tracks across which the road passes, but the characteristics of the train and the length of its braking path are not taken into account. Previous studies have shown that with the minimum width of the crossing established by the existing methodology, the stop of freight trains before the crossing after its closure is guaranteed only for speeds of no more than 30 km/h, the stop of passenger trains is no more than 60 km/h.

At higher speeds, the braking distance may not be enough, which will lead to a collision in the event of a forced stop of vehicles at a level crossing. Trains crossing a level crossing have different characteristics: travel speed and braking factors. Therefore, it is required to assess the likelihood of a collision when the vehicle is forced to stop at a level crossing.

The paper investigates the situation of a car breakdown at a railway crossing. Based on the data obtained from the locomotive on-board complexes, histograms of the distributions of the speed and the actual braking factors of trains approaching the crossing were constructed. On the basis of the obtained statistical data, the hypothesis of the subordination of the actual stopping of trains to the theoretical Cauchy distribution is confirmed. A statistical model of the distribution of the speed of trains when approaching a crossing is proposed.

A method is given for assessing the probability of a collision with a train in case of a car breakdown at a level crossing. The numerical value of the collision probability estimate was obtained by the method described in the work. The necessity of developing the APS control system based on the characteristics of the approaching train has been substantiated.

Level crossing, automatic crossing signaling, notification area, braking distance, notification time, onboard locomotive complexes.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-21-38

References

1. Larue G., Miska M., Qian G., Wullems C., Rodwell D., Chung E., Rakotonirainy A. (2020) Can road user delays at urban railway level crossings be reduced? Evaluation of potential treatments through traffic simulation. *Case Studies on Transport Policy*, vol. 8, iss. 3, September, pp. 860–869.
2. Gurevich V.L., Shchigolev S.A. (2015) Ustroystva zagrazhdeniya na pereyezdakh bez dezhurnogo rabotnika [Barrage devices at level crossings without a duty employee]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no 5, pp. 4–7. (In Russian)
3. Cheblakov V.A., Kataev M.N. (2020) Novyye sistemy pereyezdnoy signalizatsii [New crossroads signaling systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 7, pp. 5–7. (In Russian)
4. Dolgiy A. I., Khatlamadzhian A. E., Shapovalov V. V., Kucherenko P. A., Shapekin A. E. (2020) Sistema avtomatizirovannogo udalennogo upravleniya pereyezdami [Automated Distant Management System of Railway Grade Crossings]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 7, pp. 4–7. (In Russian)
5. Tilk I. G., Sergeev B. S. (2006) Primeneniye ustroystv scheta osey v pereyezdnoy signalizatsii [Using of axle counting devices in level crossing signaling]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], no. 2 (9), pp. 37–41. (In Russian)

6. Shchigolev S. A., Tatievsky S. A. (2005) Avtomaticheskaya pereyezdnyaya signalizatsiya na schetchikakh osey [Automatic level crossing signaling on axle counters]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 12, pp. 57–58. (In Russian)
7. Tilk I. G. (2010) *Novyye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki zheleznodorozhnogo transporta* [New devices for automation and telemechanics of railway transport]. Ekaterinburg, Ural State Transport University Publ., 167 p. (In Russian)
8. Efanov D. V., Plotnikov D. G., Osadchiy G. V. (2018) Servis prognozirovaniya vremennykh parametrov raboty zheleznodorozhnogo pereyezda [Service for forecasting the time parameters of the railway crossing]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], no. 4 (77), pp. 31–36. (In Russian)
9. Efanov D. V., Osadchiy G. V., Plotnikov D. G., Khoroshev V. V. (2018) Kompleksnyy uchet parametrov obyektoy infrastruktury zheleznoy dorogi, zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i avtomobil'nogo transporta dlya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na pereyezdakh [Comprehensive accounting of parameters of railway infrastructure facilities, railway rolling stock and road transport to ensure traffic safety at level crossings]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], no. 2, vol. 4, pp. 167–194. (In Russian)
10. Gerus V. L., Tarasov E. M., Tarasova A. E. (2018) Issledovaniye informativnosti priznakov pri raspoznavanii sostoyaniy rel'sovykh liniy [Studying of the informativeness of features in recognizing the states of rail lines]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. [Bulletin of the Mordovian University], no. 2, vol. 28, pp. 191–207. (In Russian)
11. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. (2015) Otsenka effektivnosti sushchestvuyushchey pereyezdnoy signalizatsii [Evaluation of the effectiveness of the existing crossing signaling]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Bulletin], no. 6 (54), pp. 58–61. (In Russian)
12. Masaytis Yu. L. (1997) Pereyezdnoy avtomaticheskii kompleks ustroystv [Crossing automatic complex of devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, p. 27. (In Russian)
13. Kamenskiy V. B., Tyupkin Yu. A., Pozdnyakov V. A. (1999) Organizatsii bezopasnosti dvizheniya na pereyezdakh – kompleksnuyu sistemnyuyu osnovu [An integrated system framework for traffic safety organizations at level crossings]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], no. 1, pp. 46–50. (In Russian)
14. Grachev G. N., Gumenik M. B. (1997) Primeneniye metoda impul'snogo zondirovaniya dlya organizatsii pereyezdnoy signalizatsii [Using of the method of impulse sounding for the organization of crossing signaling]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, pp. 28–30. (In Russian)
15. Nikitin A. B., Boltaev S. T. (2016) Obespecheniye bezopasnosti na stantsionnykh pereyezdakh pri organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya na deystvuyushchikh liniyakh [Ensuring safety at station crossings when organizing high-speed traffic on existing lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railways], no. 2, pp. 206–214. (In Russian)
16. Kirillov A. N. (2016) Modernizatsiya skhem avtomaticheskoy pereyezdnoy signalizatsii [Modernization of automatic crossing signaling schemes]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 9, pp. 30–31. (In Russian)
17. Godyaev A. I. (2004) *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy v zadachakh obespecheniya bezopasnosti zheleznodorozhnogo pereyezda: Monografiya* [Decision support system in the tasks of ensuring the safety of railway crossing: Monograph]. Khabarovsk, Dal'nevostochnyy Gosudarstvennyy Universitet Putey Soobshcheniya [Far Eastern State Transport University] Publ., p. 92. (In Russian)

18. Godyaev A. I. (2004) Bezopasnost' na pereyezdakh i sposoby snizheniya avariynosti [Safety at level crossings and ways to reduce accidents]. *Mir transporta*. [The world of transport], no. 4 (8), vol. 2, pp. 80–85. (In Russian)
19. Abioye O. F., Dulebenets M. A., Pasha J. et al. (2020) *Accident and hazard prediction models for highway–rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA*. Rail. Eng. Science 28, 251–274. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00215-w>.
20. Chris De Gruyter & Graham Currie (2016) Rail-road crossing impacts: an international synthesis. *Transport Reviews*, 36:6, 793–815.
21. Gitelman V., Hakkert A. S. (1997) The evaluation of road-rail crossing safety with limited accident statistics. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 29, iss. 2, March, pp. 171–179.
22. Borsos A., Gabor M., Koren C. (2016) Safety ranking of railway crossings in Hungary. *Transp Res Procedia*, 14:2111–2120.
23. Liang C., Ghazel M., Cazier O. et al (2017) Risk analysis on level crossings using a causal Bayesian network based approach. *Transp Res Procedia*, 25:2167–2181.
24. Davey J., Wallace A., Stenson N., Freeman J. (2008) The experiences and perceptions of heavy vehicle drivers and train drivers of dangers at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, iss. 3, May, pp. 1217–1222.
25. Haleem K., Gan A. (2015) Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U. S. *Journal of Safety Research*, vol. 53, 1 June, pp. 23–29.
26. Larue G. S., Naweed A., Rodwell D. (2018) The road user, the pedestrian, and me: Investigating the interactions, errors and escalating risks of users of fully protected level crossings. *Safety Science*, vol. 110, December, pp. 80–88.
27. Liang C., Ghazel M., Cazier O., El-Koursi E.-M. (2017) A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 108, November, pp. 181–188.
28. Popov A. N., Grishayev S. Yu. (2020) Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh pereyezdakh pered priblizhayushchimsya poyezdom [Traffic safety of stopping vehicles at railway crossings in front of an approaching train]. *Transport Urala*. [Ural transport], no. 1 (64), pp. 39–42. (In Russian)
29. Asadchenko V. R. (2006) *Avtomaticheskkiye tormoza podvizhnogo sostava: Uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. [Automatic brakes of rolling stock: a textbook for universities of railway transport]. Moscow, Marshrut Publ., 392 p. (In Russian)
30. *Pravila tyagovykh raschetov: rasporyazheniye ot 12.05.2016* [Traction calculation rules: order dated 12.05.2016], no. 867. Moscow, JSC “Russian Railways” Publ., 2016. 514 p. (In Russian)
31. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M. I. (1995) *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Electric traction theory]. Moscow, Transport Publ., 294 p. (In Russian)
32. Isaev I. P. (1970) *Sluchaynyye faktory i koeffitsiyent stsepleniya*. [Random factors and coefficient of adhesion]. Moscow, Transport Publ., 182 p. (In Russian)
33. Venttsel' Ye. S. (1999) *Teoriya veroyatnostey: Uchebnyk dlya vuzov. 6-oe izdanie* [Probability theory: Textbook for universities. 6th edition]. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 576 p. (In Russian)
34. Kobzar' A. I. (2012) *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. [Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 816 p. (In Russian)
35. Khan G., Shapiro S. (1969) *Statisticheskkiye modeli v inzhenernykh zadachakh*. [Statistical models in engineering problems]. Moscow, Mir Publ., 395 p. (In Russian)

36. В. Yu. Lemeshko, S. B. Lemeshko, S. N. Postovalov, E. V. Chimitova (2011) *Statisticheskiiy analiz dannykh, modelirovaniye i issledovaniye veroyatnostnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya* [Statistical data analysis, modeling and research of probabilistic patterns. Computer approach: monograph]. Novosibirsk, Publishing house of Novosibirsk State Technical University Publ., 888 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила 24.09.2020, принята к публикации 20.10.2020*

ПОПОВ Антон Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения
e-mail: ANPopov@usurt.ru

ГРИШАЕВ Сергей Юрьевич — первый заместитель генерального директора — главный конструктор ФГУП «ПО «Октябрь»
e-mail: gsu82@bk.ru

© Попов А. Н., Гришаев С. Ю., 2020

УДК 656.213:656.224

О. Н. Покусаев, канд. экон. наук

А. Е. Чекмарев

В. С. Евсеев

М. Л. Овсянников

К. А. Кожемякина

Научно-образовательный центр

«Цифровые высокоскоростные транспортные системы»,

Российский университет транспорта, Москва

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКОГО ГОРОДСКОГО СООБЩЕНИЯ В РАЙОНЕ БИРЮЛЕВО ВОСТОЧНОЕ В МОСКВЕ

Вот уже многие годы Москва – один из наиболее развитых в сфере транспорта мегаполисов не только России, но и мира. Благодаря реализации самой масштабной в Европе программы строительства метро в Москве за последние 10 лет появилось 83 км линий, 42 станции и 10 депо. Ключевой проект столичного метростроения сегодня – Большая кольцевая линия (БКЛ) подземки. Протяженность БКЛ составит 70 км, на ней расположится 31 станция. Тем не менее, в отдельных районах по-прежнему сохраняется проблема транспортной доступности. Передвигаясь на нескольких видах наземного городского транспорта и совершая множество пересадок, пассажиры массово стекаются к единственной ближайшей станции метро, которая и без того переполнена людьми. Поэтому жители ставят перед местными властями задачу – организовать новый удобный способ передвижения, подходящий для данного места.

К таким районам относится прежде всего Бирюлёво Восточное, где в настоящее время проживает 146 тысяч жителей, ежедневно на маршрутных такси и автобусах добирающихся до ближайшей станции метро «Царицыно». При этом в районе довольно развитая железнодорожная инфраструктура, которая не в полной мере используется для городских перевозок пассажиров. Запуск городского железнодорожного маршрута с дизель-поездом станет главным решением проблемы повышения провозной способности пассажирского транспорта общего пользования в указанном коридоре и значительного улучшения транспортной доступности Бирюлёва Восточного.

Железная дорога, дизель-поезд, Московский железнодорожный узел, внеуличный транспорт, район, транспортная доступность, путь необщего пользования

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-39-56

Введение

Вопросы развития транспортной системы Москвы являются важнейшей частью Генерального плана ее развития. Мероприятия, реализованные транспортным комплексом столицы за последние 10 лет, качественно улучшили транспортную доступность целого ряда районов, но при этом изменили ее облик. На 62 %

увеличился пассажиропоток, открылось 49 станций метрополитена, запущено пассажирское движение на Московском центральном кольце. Начали работу два центральных диаметра с ожидаемым пассажиропотоком до 203 млн человек в год. Реконструировано более 200 км трамвайных путей, регулярно обновляется подвижной состав. Между тем жители некоторых густонаселенных районов города в силу особенностей географического расположения по-прежнему ежедневно испытывают трудности с поездками на работу и домой [1, 2].

Одним из таких районов, в частности, является Бирюлёво Восточное в Южном административном округе. В настоящее время транспортную доступность

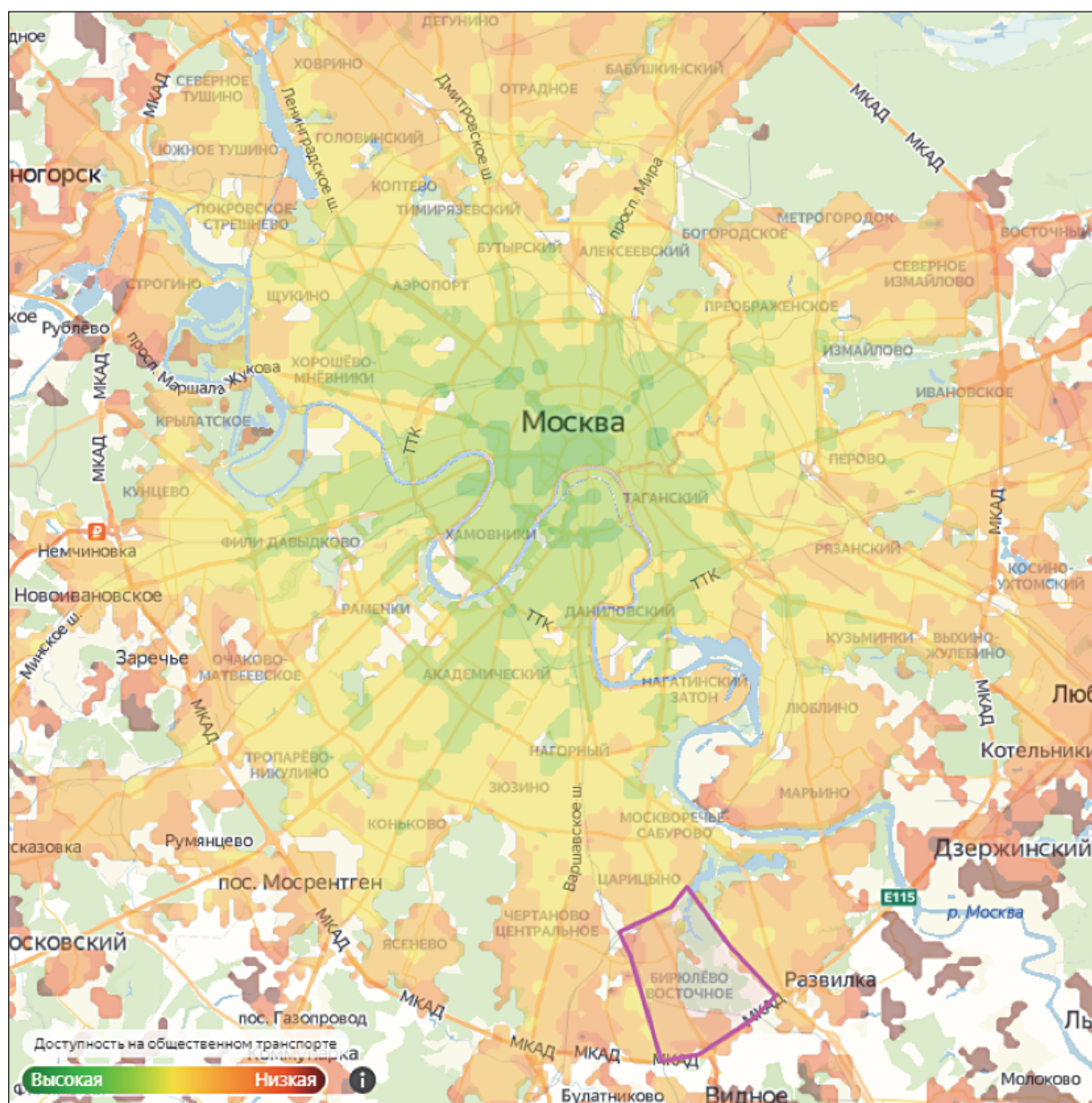


Рис. 1. Доступность районов Москвы на общественном транспорте по данным сервисов Яндекс

здесь можно охарактеризовать как среднюю согласно данным сервисов Яндекса, основанным на времени в пути на общественном транспорте до самых популярных мест в городе. Транспортная доступность районов Москвы представлена на рисунке 1, границы Бирюлёва Восточного обозначены фиолетовым цветом [3].

Для решения проблемы повышения качества транспортного обслуживания населения в современных мегаполисах нередко обращаются к проектам организации городских железнодорожных маршрутов. Особенно привлекательным этот вид транспорта становится в условиях перегруженной улично-дорожной сети, плохой экологии и дефицита провозной способности по основным коридорам в отдельных частях мегаполиса. Городская железная дорога, напротив, преобразует старые индустриальные районы, делая их привлекательными не только с точки зрения транспортной доступности, но и в плане создания современных общественных пространств, магазинов, центров отдыха и другой активности [4–13].

Сразу отметим, что в России и некоторых республиках бывшего СССР успешно воплощались проекты, связанные с организацией пассажирского сообщения на ведомственных железнодорожных линиях широкой колеи, в т. ч. на путях необщего пользования [14].

Одним из последних пассажирских маршрутов, запущенных на железнодорожной инфраструктуре необщего пользования, стал открытый в 2013 году Москва-Киевская — Солнечная — Новопеределкино, созданный с целью решения транспортных проблем районов Солнцево и Новопеределкино [15]. Аналогичный проект может быть реализован и на существующем пути необщего пользования Московского коксогазового завода, проходящем по территории района Бирюлёво Восточное. В нашей работе рассматривается возможность повышения качества транспортного обслуживания жителей этого района за счет организации нового городского железнодорожного маршрута по существующей железнодорожной инфраструктуре, определяются потребительские свойства нового сервиса и необходимые для его реализации инфраструктурные мероприятия.

1. Действующая транспортная инфраструктура района

Образованный в 1995 году район Бирюлёво Восточное ранее находился на месте поселка Бирюлёво, включенного в состав Москвы в 1960 году. Согласно закону «О территориальном делении города Москвы» граница района проходит по городской черте, включая все транспортные развязки, далее по осям Павелецкого и Курского направлений Московской железной дороги, по улицам Лисичанской и Тюриня, западным границам Царицынского парка, дендропарка и Бирюлёвского лесопарка до МКАД. Около половины территории занимает уникальный дендропарк.

Жители неоднократно обращались к муниципальным властям и транспортным чиновникам с просьбой организовать железнодорожное пассажирское

сообщение в районе. Одним из таких обращений является письмо следующего содержания:

«Здравствуйте! Прошу рассмотреть возможность сделать новую железнодорожную станцию в районе Бирюлёво Восточное для обслуживания транспортом жителей. В районе нет метро, и жителям нужно ехать на работу или учебу на автобусе до ближайшего метро».

Бирюлёво Восточное — один из немногих районов Москвы, на территории которого сегодня нет ни одной станции метрополитена. Это вынуждает большую часть жителей пользоваться наземным транспортом для проезда до ближайшей станции метро и железной дороги — Царицыно [16].

Станция метро «Царицыно» Замоскворецкой линии Московского метрополитена находится на территории одноимённого района Южного административного округа Москвы. Наземные вестибюли отсутствуют, выйти в город можно по подземным переходам к улицам Луганской, Товарищеской и Каспийской, а также к платформе Царицыно Курского направления Московской железной дороги. В настоящее время платформа приобрела статус остановочного пункта второго Московского центрального диаметра (D2).

«Царицыно» — одна из самых загруженных станций метрополитена столицы. Среднесуточный пассажиропоток составляет около 97 тысяч человек. Столь высокий показатель объясняется тем, что многие пассажиры Курского направления пересекаются здесь с железнодорожного транспорта на метро. Также сюда осуществляется массовый подвоз пассажиров на автобусах из Бирюлёва Восточного. Суммарный ежедневный пассажиропоток составляет 42 050 человек в сутки.

В зоне тяготения района находится станция Бирюлёво-Пассажирская — остановочный пункт Павелецкого направления Московской железной дороги. Тут останавливаются практически все проходящие электропоезда, кроме аэроэкспрессов в «Домодедово» и нескольких региональных экспрессов. Суммарный ежедневный пассажиропоток по данному остановочному пункту составляет 17 859 человек в сутки, поэтому по рабочим дням для шести пар электропоездов станция является конечной. Время движения электропоездов от Павелецкого вокзала в среднем 27 минут.

К железнодорожной станции Царицыно Курского направления примыкает Бирюлёвская соединительная ветвь к станции Бирюлёво-Товарная Павелецкого направления. Эта ветвь используется для движения пассажирских поездов дальнего следования и грузовых поездов, пригородные электропоезда по ней сейчас не ходят. Бирюлёво-Товарная — узловая железнодорожная станция Павелецкого направления. Суммарный ежедневный пассажиропоток пригородных электропоездов — 11 063 человек. К станции примыкает путь необщего пользования Московского коксогазового завода (АО «Москокс») [17].

Наличие пути необщего пользования, обслуживающего завод, и проблемы с транспортной доступностью района, связанные с отсутствием метро,

весомые предпосылки для создания на имеющейся железнодорожной инфраструктуре пассажирского сервиса. Он позволит обеспечить новые микрорайоны в Московской области и жилые массивы внутри МКАД удобным массовым транспортом для подвоза пассажиров из Бирюлёва Восточного к метрополитену, железнодорожным станциям Павелецкого и Курского направлений.

Как показано на рисунке 2, путь необщего пользования АО «Московский коксогазовый завод» начинается в границах станции Бирюлёво-Товарная Павелецкого направления и заканчивается промышленной станцией Обменная. Путь является однопутным, на нем располагаются две станции: Обменная и Заводская.

Заводская, в свою очередь, состоит из двух парков: Парк А и Парк Б. К станциям примыкают многочисленные ветви промышленных путей с соседних предприятий, основные пользователи железнодорожной инфраструктуры – ОАО «Гипсобетон», Видновская нефтебаза (принадлежит ПАО «Лукойл»), ФГУП «АТУ» ФСБ России и пр. Всего на рассматриваемом пути необщего пользова-

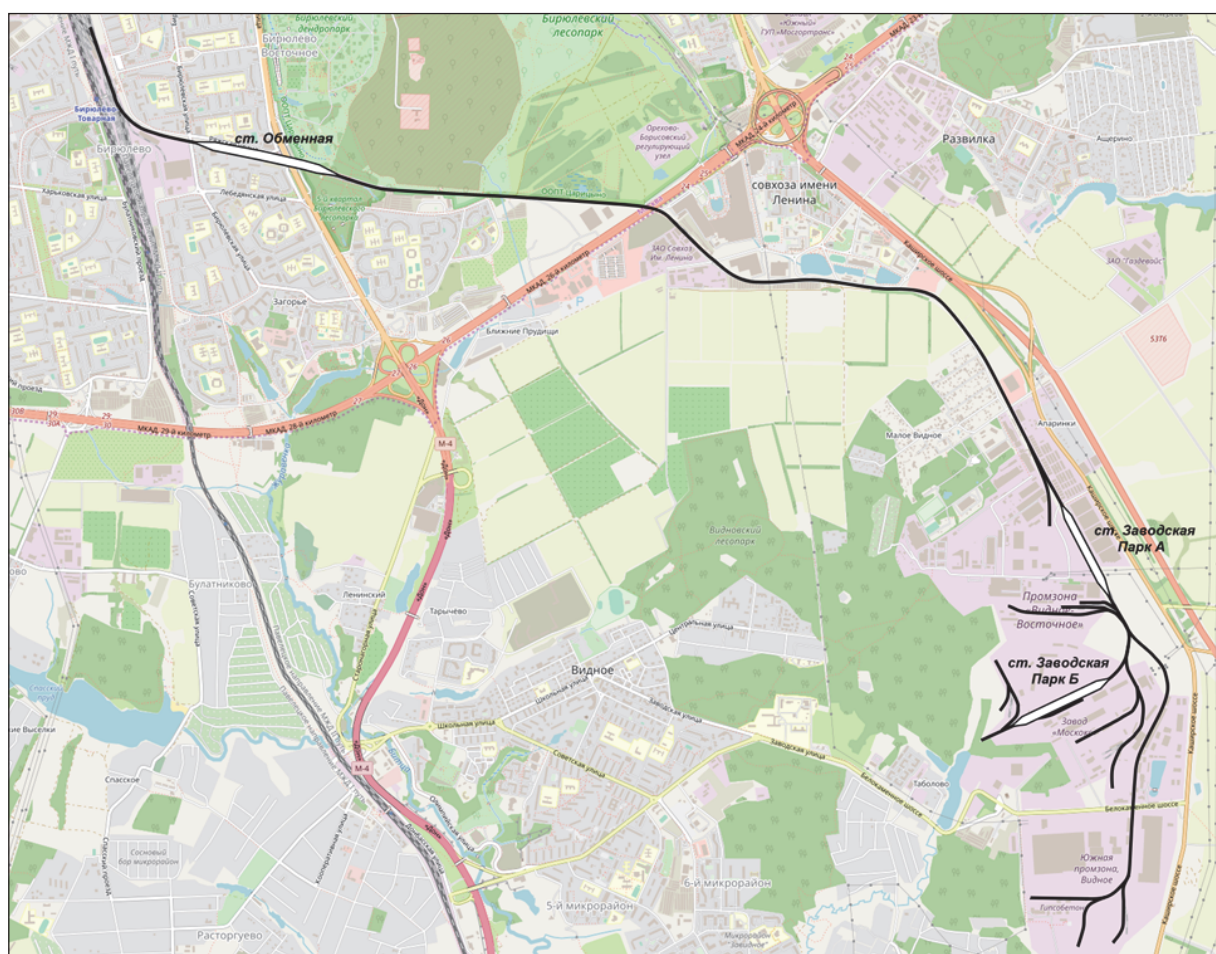


Рис. 2. Схема железнодорожного пути необщего пользования завода АО «Москокс»

ния сосредоточено пять поставщиков различного сырья — потребителей услуг железнодорожного транспорта.

Между тем суточные размеры грузовой работы на данном пути необщего пользования незначительны.

За сутки, как правило, со станции Бирюлёво-Товарная осуществляется не более четырех подач. Низкая степень использования имеющихся и удачно расположенных путей необщего пользования привела нас к идее организации внутригородского железнодорожного маршрута с участием железнодорожной инфраструктуры пути необщего пользования завода АО «Москокс» и участков радиальных направлений — Павелецкого и Курского. Благодаря такому маршруту в перспективе можно качественно улучшить транспортную доступность Бирюлёва Восточного и обеспечить потребности жителей района. в удобных маршрутах [18].

Однако неизбежно встает вопрос о выборе рационального места завершения маршрута на Курском направлении с тем, чтобы пассажирам было удобно сделать пересадку на метро и МЦД. С одной стороны, маршрут можно проложить до ближайшей станции метро «Царицыно». Но таким образом жители сталкиваются с уже существующей проблемой — перегруженностью данного транспортно-пересадочного узла, куда уже сегодня массово прибывают пассажиры из области.

2. Использование путей необщего пользования для организации пассажирского сообщения

Концепция организации пассажирского сервиса предполагает задействование в пассажирском сообщении участка подъездного пути от железнодорожного переезда в Апаринках до станции Бирюлёво-Товарная. Далее по инфраструктуре ОАО «РЖД» (общего пользования) маршрут прокладывается по соединительной ветви Бирюлёво-Товарная — Царицыно с выходом на Курское направление. Поезда смогут проследовать до станции Люблино и далее съезжать на Московское центральное кольцо с организацией конечной станции Угрешская или Новохохловская и возможности пересадки пассажиров на МЦК, как показано на рисунке 3.

Изначально было предложено организовать пассажирское сообщение только до станции Царицыно, но в силу излишней нагрузки на этот транспортно-пересадочный узел логичным решением будет продлить новый маршрут до Московского центрального кольца. Каким образом можно осуществить прямую связь для поездов нового маршрута между Курским направлением и Московским центральным кольцом? Вопрос этот на самом деле не из легких, поскольку необходимо учесть затраты времени и средств на строительные работы, удобство пересадки и рациональность прокладывания трассы маршрута с учетом затрат времени пассажиров в пути. Поэтому предлагается два

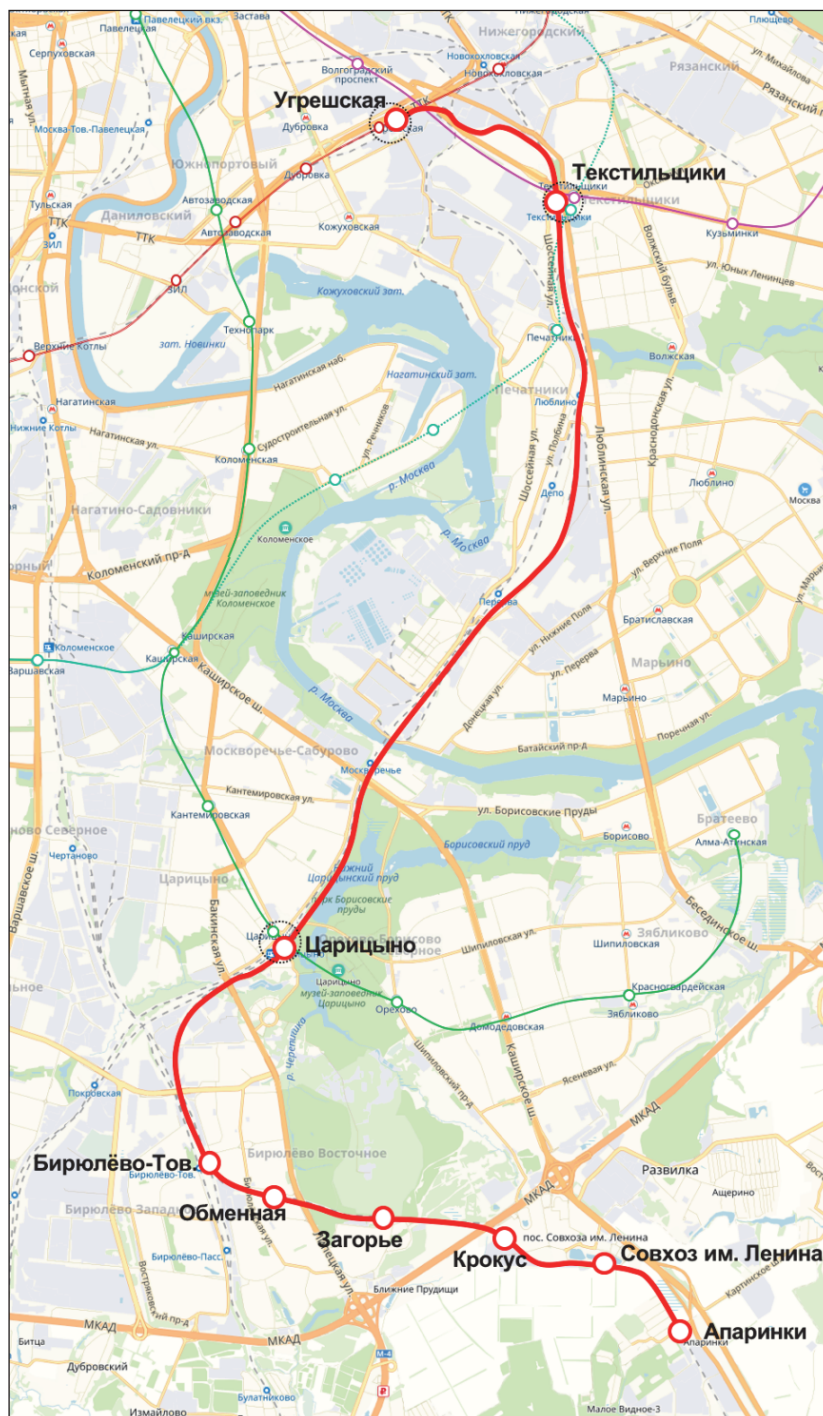


Рис. 3. Схема организации пассажирского сообщения с использованием пути необщего пользования завода АО «Москок»

варианта соединения района Бирюлёво Восточное с Московским центральным кольцом, как показано на рисунке 4: до станции Новохохловская и до станции Угрешская.

При выборе Новохохловской в качестве конечной станции необходимо обустроить там пассажирскую инфраструктуру, а также реконструировать железно-

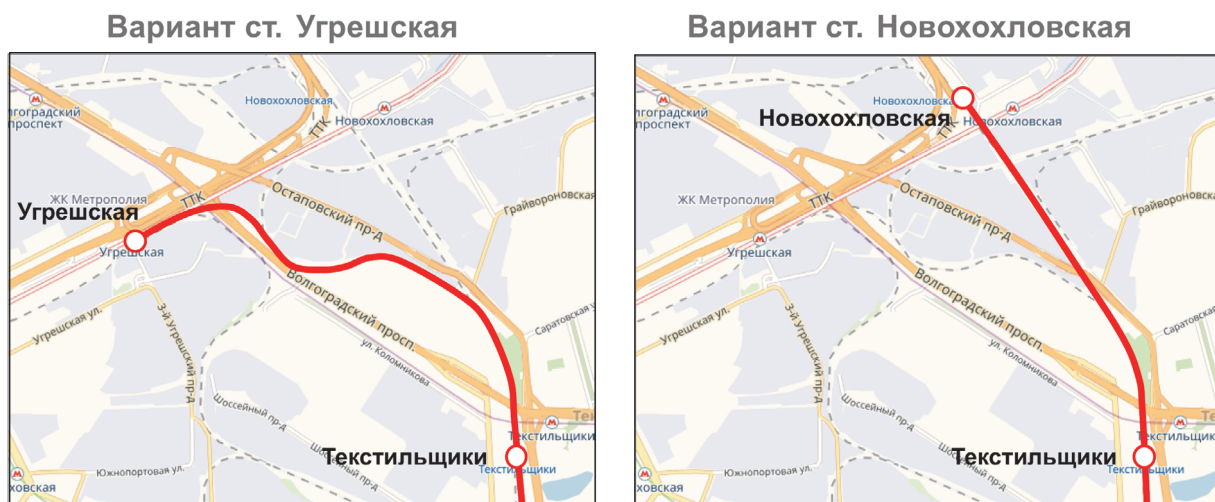


Рис. 4. Варианты завершения маршрута пассажирского сообщения от станции Апаринки до Московского центрального кольца

дорожную станцию Люблино для возможности беспрепятственного пропуска поездов нового маршрута со строительством дополнительной пары главных путей на участке Люблино — Новохохловская Курского направления. Однако из-за этих локальных мероприятий будет нарушена организация оборота поездов Курского направления по станции Новохохловская. К тому же маршрут станет в значительной степени дублировать маршрут D2 Московских центральных диаметров.

Впрочем, при таком варианте организации сообщения время движения поездов от остановочного пункта Текстильщики до станции Новохохловская Курского направления составит три минуты. Время, затрачиваемое пассажирами на пересадку на Московское центральное кольцо от платформы Новохохловская Курского направления, составит семь минут, что вызывает сомнения в правильности выбора для реализации данного варианта. Поэтому он больше подходит как зонная станция для оборота дальних пригородных поездов Курского направления и как зонная станция на период закрытия Курского вокзала на реконструкцию, а не для регулярного пассажирского сервиса, который должен быть удобным и комфортным для пассажиров.

Второй вариант — продление маршрута до станции МЦК Угрешская — технически более сложный. Для реализации идеи необходимо реконструировать станцию Люблино, устроить дополнительные съезды на соединительной ветви Угрешская — Люблино. Кроме того, на станции Угрешская сократится количество путей, предназначенных для грузовой работы.

Главное преимущество такого варианта в том, что время, затрачиваемое пассажирами на пересадку на Московское центральное кольцо, составит всего две минуты, что гораздо комфортнее семиминутной пересадки на станции Новохохловская в первом варианте. Поэтому второй вариант, на наш взгляд,

более правильный при выборе конечной станции для поездов из Бирюлёва (или как временное решение до окончания строительства III–IV главных путей Курского направления до станции Москва-Пассажирская — Курская).

Таким образом, было решено организовать пассажирское сообщение для жителей района Бирюлёво Восточное от станции Апаринки через станцию Царицыно до станции Угрешская МЦК. Общая длина маршрута составит 25 км, а время хода — примерно 40 минут, с учетом девяти остановочных пунктов на протяжении всего маршрута. Такой внутригородской железнодорожный маршрут обеспечит пассажиров пересадкой на метро, Московское центральное кольцо и центральные диаметры. Чтобы реализовать весь проект, необходимо провести ряд реконструкционных мероприятий на всех железнодорожных станциях, через которые проходит новый маршрут. К первоочередным мероприятиям в этом случае можно отнести:

- обустройство конечной станции Угрешская, остановочных пунктов Текстильщики, Загорье и Вегас;
- реконструкцию ветви Малого кольца Московской железной дороги с укладкой дополнительного съезда;
- завершение сооружения всей запланированной железнодорожной и пассажирской инфраструктуры на станции Царицыно;
- устройство дополнительного главного пути перегона Царицыно — Бирюлёво-Товарная;
- реконструкцию станций Бирюлёво-Товарная и Обменная (на пути необщего пользования);
- модернизацию технических средств сигнализации, централизации и блокировки на пути необщего пользования АО «Московский коксогазовый завод» с оборудованием линии трехзначной автоматической блокировкой.

Реконструкционные работы по модернизации станции Апаринки и обустройству нового остановочного пункта «Совхоз им. Ленина» займут гораздо больше времени по сравнению с вышеперечисленными, поэтому завершение строительства путевого развития на станции Апаринки и разъезда на остановочном пункте «Совхоз им. Ленина» может произойти уже после открытия регулярного пассажирского движения. По предварительным оценкам, суммарный объем капитальных вложений в пассажирскую и железнодорожную инфраструктуры для перспективного маршрута составляет 14,1 млрд рублей.

Благодаря реализации этого проекта появится регулярный городской железнодорожный маршрут для жителей Бирюлёва Восточного с интервалом движения 10 минут. Интервалы движения — один из основных факторов, определяющих привлекательность общественного транспорта и его востребованность, особенно в городской черте [19–23]. Поскольку будущая линия однопутная, частота движения поездов с интервалом 10 минут будет обеспечена за счет наличия необходимого количества разъездов, в т. ч. в границах станции Бирюлёво-Товарная, на участке от остановочного пункта Загорье и в месте рас-

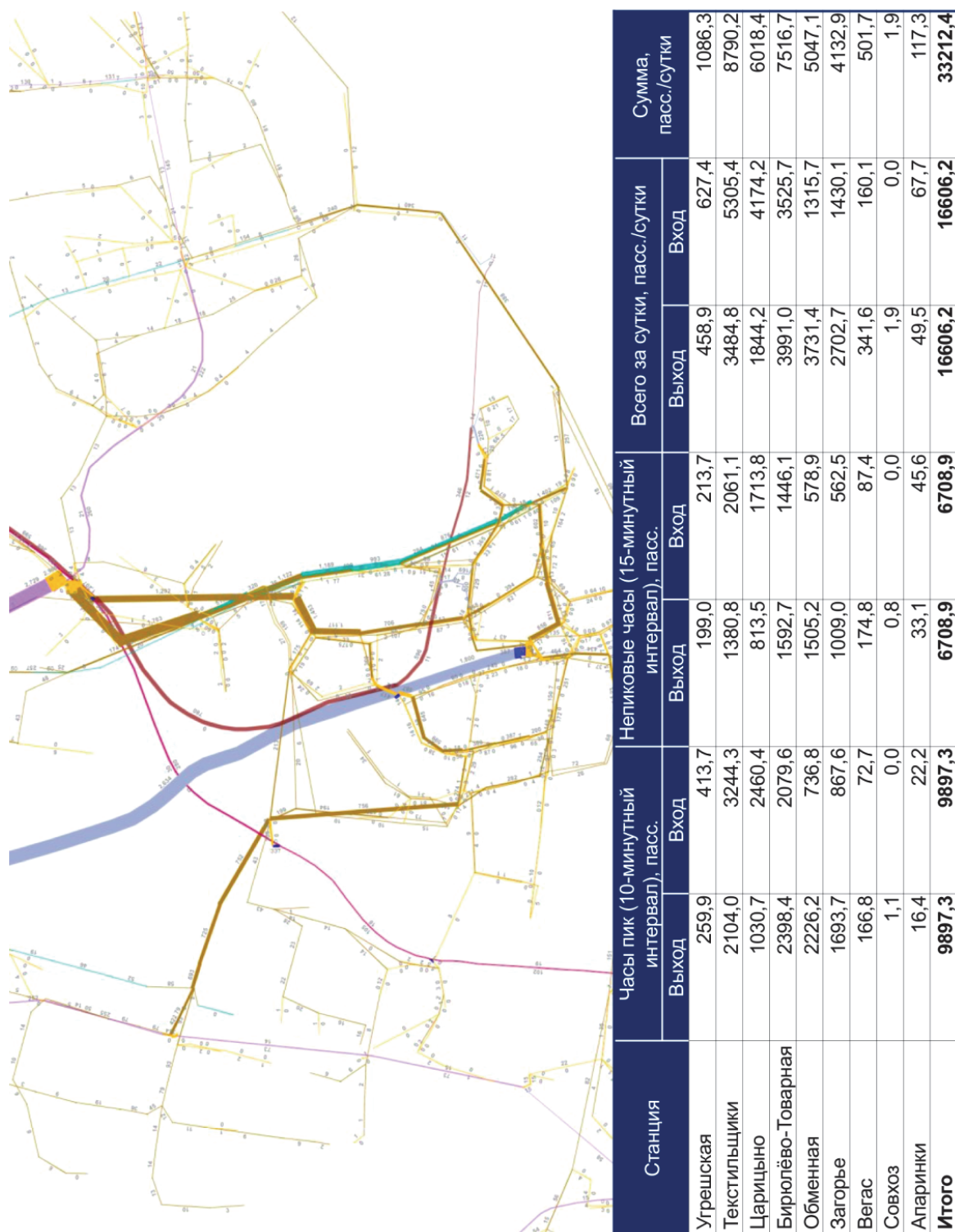


Рис. 5. Пассажиропотоки в коридорах по району Бирюлёво Восточное

положения остановочного пункта «Совхоз им. Ленина». По результатам моделирования и оценкам специалистов, суточный пассажиропоток на участке может достигать 17 000 пассажиров в сутки, как показано на рисунке 5.

Согласно расчетному графику движения поездов по участкам Угрешская – Царицыно – Апаринки, представленному на рисунке 6, время оборота подвижного состава на конечных станциях должно составлять 10 минут. При этом на обеих конечных станциях требуется наличие двух путей для оборота подвижного состава.

Еще один интересный вопрос возникает в связи с выбором типа подвижного состава для перевозок по новому маршруту. Значительная часть его проходит по однопутному неэлектрифицированному пути необщего пользования, поэтому выбор пал на дизель-поезда или мотрисы. Подвижной состав при этом

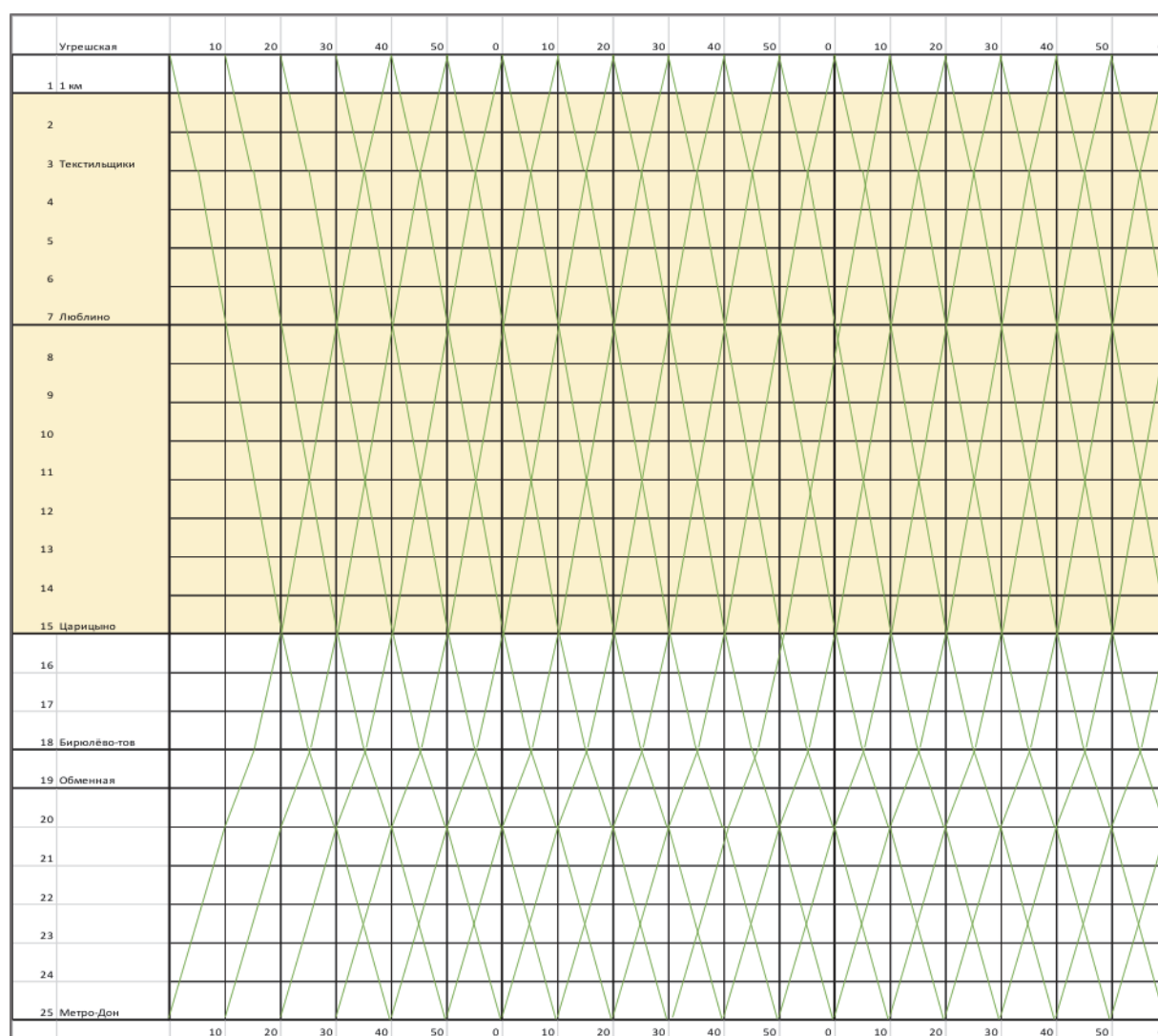


Рис. 6. Фрагмент расчетного графика движения пассажирских поездов на участках Угрешская – Царицыно – Апаринки с 10-минутным интервалом

должен предусматривать возможность формирования поездов разной составности — от двух до четырех вагонов (ввиду прогнозируемого небольшого пассажиропотока). По предварительным расчетам, для реализации целевых размеров движения и при необходимости наличия резервного состава, а также для выполнения планового технического обслуживания, суммарно потребуется 10 составов. Двухвагонный дизель-поезд, представленный на рисунке 7, применяется для пригородных перевозок в маленьких городах и на линиях с невысоким пассажиропотоком. Поэтому любой подобный вариант подвижного состава вполне может быть использован для организации пассажирских перевозок по новому маршруту. В России, например, производство современных дизель-поездов налажено на заводе АО «Метровагонмаш» в Мытищах (с 2019 г. выпускает рельсовые автобусы серии РА-3). Демонстрационный образец такого дизель-поезда был представлен на выставке в Щербинке в августе 2019 г.



Рис. 7. Современный двухвагонный дизель-поезд – наиболее подходящий тип подвижного состава для нового маршрута

Заключение

Подводя итоги, сделаем вывод: для улучшения транспортной доступности района Бирюлёво Восточное на существующих железнодорожных путях необходимого пользования завода АО «Москокс» возможно организовать регулярный

внутригородской железнодорожный маршрут Апаринки – Царицыно – Угрешская. С открытием движения поездов по нему жители получают надежный транспортный коридор с возможностью пересадки на метро, Московское центральное кольцо и Московские центральные диаметры. Чтобы обеспечить частоту движения поездов с интервалом 10 минут, необходимо провести ряд реконструкционных мероприятий на существующей железнодорожной инфраструктуре общего и необщего пользования. Затратив около 15 млрд рублей на строительство и модернизацию инфраструктуры, а также закупку подвижного состава, город получит новый вид сообщения, которым смогут пользоваться жители всего Бирюлёва Восточного.

С учетом острой проблемы транспортной доступности района проработан вопрос об организации нового внутригородского железнодорожного маршрута с использованием существующих путей необщего пользования завода АО «Москокс». Предлагаемый маршрут проходит через станции Апаринки, Крокус, Бирюлёво-Товарная, Царицыно, Текстильщики, Угрешская. Он станет удобным средством передвижения от дома на работу и обратно для 150 тыс. человек.

Для открытия движения поездов по новому маршруту с интервалом 10 минут необходимо провести реконструкцию станций и обустроить новую пассажирскую инфраструктуру. Современные дизель-поезда или мотрисы обеспечат комфортную поездку для москвичей, проживающих в зоне тяготения останочных пунктов на этом маршруте. Поэтому данный проект вполне можно считать перспективным транспортным продуктом, значительно улучшающим уровень доступности не только района Бирюлёво Восточное, но и всей Москвы.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р : в ред. распоряжений Правительства РФ от 12.05.2018 № 893-р // Консультант Плюс. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/f62ee45faefd8e2a11d6d88941-ac66824f848bc2/ (дата обращения : 12.02.2020). – Текст : электронный.
2. Мэр Москвы : официальный сайт. – Москва. – 2020. – URL : <https://www.mos.ru> (дата обращения : 19.02.2020). – Текст : электронный.
3. Система поиска недвижимости : сайт. – Москва. – 2020. – URL : <https://realty.yandex.ru/> (дата обращения : 15.02.2020). – Текст : электронный.
4. Правительство Москвы. Программа развития Москвы «Москва – город, удобный для жизни» – 2014 г. // Мэр Москвы : официальный сайт. – URL : <http://s.mos.ru/common/upload/M2025.pdf> (дата обращения : 16.03.2020). – Текст : электронный.
5. Намиот Д. Е., Кутузманов З. М., Федоров Е. А., Покусаев О. Н. Об оценке социально-экономических эффектов городской железной дороги / Д. Е. Намиот, З. М. Кутузманов, Е. А. Федоров, О. Н. Покусаев. – Текст : электронный // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 92–103. – URL : <https://www.>

- semanticscholar.org/paper/Об-оценке-социально-экономических-эффектов-железной-Намиот-Курузманов/5478afcc6c46688d7b361be5b97b468a1d1b7f79 (дата обращения : 20.03.2020).
6. Куприяновский В. П., Акимов А. В., Покусаев О. Н., Аленков В. В., Намиот Д. Е., Синягов С. А. Интеллектуальная мобильность и мобильность как услуга в умных городах / В. П. Куприяновский, А. В. Акимов, О. Н. Покусаев, В. В. Аленков, Д. Е. Намиот, С. А. Синягов. – Текст : электронный // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – № 12. – С. 77–122. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30739227> (дата обращения : 20.03.2020).
 7. Philipp Heyken Soares, Christine L. Mumford, Kwabena Amponsah & Yong Mao. An adaptive scaled network for public transport route optimization / Philipp Heyken Soares, Christine L. Mumford, Kwabena Amponsah & Yong Mao. – Текст : электронный // Public Transport Journal. – 2019. – Vol. 11. – P. 379–412. – URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/An-adaptive-scaled-network-for-public-transport-Heyken-Soares-Mumford/82608380af6a8c3e8a57e8fc2832293cb8331b6f> (дата обращения : 13.04.2020).
 8. Alexa Delbosc, Graham Currie. Transport problems that matter – social and psychological links to transport disadvantage / Alexa Delbosc, Graham Currie – Текст : электронный // Journal of Transport Geography. – 2011. – Vol. 19. – № 1. – P. 170–178. – URL : [https://socionet.ru/publication.xml?h=repec:eee:jotrg:v:19:y:2011:i:1:p:170–178](https://socionet.ru/publication.xml?h=repec:eee:jotrg:v:19:y:2011:i:1:p:170-178) (дата обращения : 14.01.2020).
 9. Sabina Jeschke. Global Trends in Transport Routes and Goods Transport : Influence on Future International Loading Units/Sabina Jeschke. – Текст: электронный // Discussion Paper – 16th ACEA SAG Meeting. – 2011. – URL : <https://pdfslide.net/documents/global-trends-in-transport-routes-and-goods-global-trends-in-transport-routes.html> (дата обращения : 16.03.2020).
 10. Tiffany Fishman, Mahesh Kelkar, Avi Schwartz, J. Bryan Nicol, Rana Sen. Transportation trends 2020 / Tiffany Fishman, Mahesh Kelkar, Avi Schwartz, J. Bryan Nicol, Rana Sen. – Текст: электронный // Deloitte – Digital media trends survey, 14th edition. – 2020. – Vol. 20. – P. 80–100. – URL : <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/public-sector/transportation-trends.html> (дата обращения : 14.05.2020).
 11. Vanessa Stjernborg, Ola Mattisson. The Role of Public Transport in Society – A Case Study of General Policy Documents in Sweden / Vanessa Stjernborg, Ola Mattisson – Текст : электронный // Journal Sustainability. – 2016. – Vol. 8. – № 11. – P. 1–16. – URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/11/1120/htm> (дата обращения : 26.02.2020).
 12. Ведомственные железные дороги широкой колеи, имеющие пассажирское сообщение : сайт. – Москва, 2020. – URL : http://infojd.ru/spisok_vl.html (дата обращения : 15.05.2020).
 13. Железнодорожная линия «Солнечная – Новопеределкино» : сайт. – Москва, 2020. – URL : <http://infojd.ru/06/snp.html> (дата обращения : 16.05.2020).
 14. Управа района «Бирюлёво Восточное» : официальный сайт. – Москва, 2020. – URL : <https://bv.mos.ru/> (дата обращения : 01.03.2020).
 15. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы : официальный сайт. – Москва, 2020. – URL : <https://stroimsk.ru/> (дата обращения : 02.03.2020).
 16. Московский коксогазовый завод : официальный сайт. – Москва, 2020. – URL : <http://www.mechel.ru/sector/mining/mkz> (дата обращения : 04.02.2020).
 17. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Чекмарев А. Е. Оценка пассажиропотока для новых линий железной дороги в Московском регионе / Д. Е. Намиот, О. Н. Покусаев, А. Е. Чекмарев. – Текст: электронный // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. –

- Т. 6. – № 10 – С. 22–28. – URL : <https://istina.msu.ru/publications/article/149074652/> (дата обращения : 01.04.2020).
18. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Лазуткина В. С. О моделях пассажирского потока для городских железных дорог / Д. Е. Намиот, О. Н. Покусаев, В. С. Лазуткина. – Текст : электронный // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – № 3 – С. 9–14. – URL : <https://istina.msu.ru/publications/article/103469572/> (дата обращения : 05.02.2020).
 19. Yaoli Wang, Di Zhu, Ganmin Yin, Zhou Huang & Yu Liu. A unified spatial multigraph analysis for public transport performance / Yaoli Wang, Di Zhu, Ganmin Yin, Zhou Huang & Yu Liu – Текст : электронный // Institute of Remote Sensing and Geographical Information Systems – Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – № 9573. – P. 1–15. – URL : <https://www.pubfacts.com/detail/32532999/A-unified-spatial-multigraph-analysis-for-public-transport-performance> (дата обращения : 14.04.2020).
 20. Мищенко А. В., Сабаткоев Т. Р. Оценка эффективности инвестиционного проекта расширения маршрутной сети городского транспорта / А. В. Мищенко, Т. Р. Сабаткоев. – Текст : электронный // Экономический анализ: теория и практика – 2012. – Т. 22. – № 277. – С. 10–14. – URL : <https://publications.hse.ru/articles/54865187> (дата обращения : 07.02.2020).
 21. Xinhua Zheng, Wei Chen, Pu Wang, Dayong Shen, Songhang Chen, Xiao Wang, Qingpeng Zhang. Big Data for Social Transportation / Xinhua Zheng, Wei Chen, Pu Wang, Dayong Shen, Songhang Chen, Xiao Wang, Qingpeng Zhang – Текст : электронный // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17. – № 3. – P. 620–630. – URL : https://www.researchgate.net/publication/288246221_Big_Data_for_Social_Transportation (дата обращения : 06.05.2020).

O. N. Pokusaev, Ph. D.

A. E. Chekmarev

V. S. Evseev

M. L. Ovsyannikov

K. A. Kozhemyakin

*Scientific and educational center "Digital high-speed transport systems",
Russian University of Transport, Moscow*

OPERATION OF EXISTING RAILWAYS OF NONCOMMON ORGANIZATION USES FOR ORGANISING OF PASSENGER CITY SERVICE IN THE DISTRICT OF BIRYULEVO VOSTOCHNOE IN MOSCOW

For many years now, Moscow has been one of the most developed megalopolises in the field of transport, not only in Russia, but also in the world. Thanks to the implementation of the largest metro construction program in Europe over the past 10 years, 83 km of lines, 42 stations and 10 depots have been built in Moscow. The key project of the capital's metro construction today is the Big Ring Line (BCL) of the subway. The BCL will be 70 km long and will house 31 stations. Nevertheless, in some areas, the problem of transport accessibility remains.

Travelling by several means of public transport and making many transfers, passengers flock en masse to the only nearest metro station, which is already overcrowded with people. Therefore, the

residents put before the local authorities the task of organizing a new convenient way of transportation, suitable for the place.

Such areas include, first of all, Biryulyovo Vostochnoye, where 146 thousand residents currently live and travel by minivans taxis and buses to the nearest metro station "Tsaritsyno" daily. At the same time, the district has a fairly developed railway infrastructure, which is not fully used for urban passenger transportation.

The launch of an urban railway route with a diesel train will be the main solution to the problem of increasing the carrying capacity of public passenger transport in this corridor and significantly improve the transport accessibility of Biryulyovo Vostochnoe.

Railway, diesel train, Moscow railway junction, off-street transport, district, transport accessibility, non-public road

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-39-56

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda: utverzhennaya rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. № 1734-r: v red. rasporyazheniy Pravitel'stva RF ot 12.05.2018 № 893-r* [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030: approved. by order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-r: as amended by orders of the Government of the Russian Federation of 05/12/2018 No. 893-r]. Konsul'tant Plyus. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/\(accessed: 12.02.2020\)](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/(accessed: 12.02.2020)). (In Russian)
2. *Mer Moskvy: ofitsial'nyy sayt* [Moscow Mayor: official website]. Moscow, 2020. URL: [https://www.mos.ru/\(accessed: 19.02.2020\)](https://www.mos.ru/(accessed: 19.02.2020)). (In Russian)
3. *Sistema poiska nedvizhimosti: sayt* [Property search engine: website]. Moscow, 2020. URL: [https://realty.yandex.ru/\(accessed: 15.02.2020\)](https://realty.yandex.ru/(accessed: 15.02.2020)). (In Russian)
4. *Pravitel'stvo Moskvy. Programma razvitiya Moskvy «Moskva – gorod, udobnyy dlya zhizni» – 2014 g.* [The government of Moscow. Moscow development program "Moscow – a city convenient for Life" – 2014]. *Mer Moskvy: ofitsial'nyy sayt*. [Mayor of Moscow: official website]. URL: <http://s.mos.ru/common/upload/M2025.pdf> (accessed: 16.03.2020) (In Russian)
5. Namiot D. Ye., Kutuzmanov Z. M., Fedorov Ye. A., Pokusayev O. N. (2018) Ob otsenke sotsial'no-ekonomicheskikh effektiv gorodskoy zheleznoy dorogi [On the assessment of the socio-economic effects of the city railway]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 92–103. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Oб-оценке-социально-экономических-эффектов-железной-Намиот-Кутузманов/5478afcc6c46688d7b361be5b97b468a1d1b7f79> (accessed: 20.03.2020). (In Russian)
6. Kupriyanovskiy V. P., Akimov A. V., Pokusayev O. N., Alen'kov V. V., Namiot D. Ye., Sinyagov S. A. (2017) Intel'lektual'naya mobil'nost' i mobil'nost' kak ushuga v umnykh gorodakh [Smart mobility and mobility as a service in smart cities]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 5, no. 12, pp. 77–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30739227> (accessed: 20.03.2020). (In Russian)
7. Philipp Heyken Soares, Christine L. Mumford, Kwabena Amponsah & Yong Mao. (2019) An adaptive scaled network for public transport route optimization. *Public Transport Journal*, vol. 11, pp. 379–412. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-adaptive-scaled-network-for-public-transport-Heyken-Soares-Mumford/82608380af6a8c3e8a57e8fc2832293cb8331b6f> (accessed: 13.04.2020).

8. Alexa Delbosc, Graham Currie. (2011) Transport problems that matter – social and psychological links to transport disadvantage. *Journal of Transport Geography*, vol. 19, no. 1, pp. 170–178. URL: <https://socionet.ru/publication.xml?h=repec: eee: jotrge: v:19: y:2011: i:1: p:170–178> (accessed: 14.01.2020).
9. Sabina Jeschke. (2011) Global Trends in Transport Routes and Goods Transport: Influence on Future International Loading Units. Discussion Paper. *16th ACEA SAG Meeting*. URL: <https://pdfslide.net/documents/global-trends-in-transport-routes-and-goods-global-trends-in-transport-routes.html> (accessed: 16.03.2020).
10. Tiffany Fishman, Mahesh Kelkar, Avi Schwartz, J. Bryan Nicol, Rana Sen. (2020) Transportation trends 2020. *Deloitte – Digital media trends survey, 14th edition*, vol. 20, pp. 80–100. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/public-sector/transportation-trends.html> (accessed: 14.05.2020).
11. Vanessa Stjernborg, Ola Mattisson. (2016) The Role of Public Transport in Society – A Case Study of General Policy Documents in Sweden. *Journal Sustainability*, vol. 8, no. 11, pp. 1–16. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/11/1120/htm> (accessed: 26.02.2020).
12. *Vedomstvennyye zheleznyye dorogi shirokoy kolei, imeyushchiye passazhirskeye soobshcheniye: sayt*. [Departmental broad-gauge railways with passenger traffic: website]. Moscow, 2020. URL: http://infojd.ru/spisok_vl.html (accessed: 15.05.2020) (In Russian)
13. *Zheleznodorozhnaya liniya «Solnechnaya – Novoperedelkino»*; *sayt* [Railway line “Solnechnaya – Novoperedelkino”: website]. Moscow, 2020. URL: <http://infojd.ru/06/snp.html> (accessed: 16.05.2020). (In Russian)
14. *Uprava rayona «Biryulovo Vostochnoye»: ofitsial’nyy sayt* [Government of the district “Biryulevo Vostochnoye”: official site]. Moscow, 2020. URL: <https://bv.mos.ru/> (accessed: 01.03.2020). (In Russian)
15. *Kompleks gradostroitel’noy politiki i stroitel’sтва goroda Moskvy: ofitsial’nyy sayt* [Complex of urban planning policy and construction of the city of Moscow: official site]. Moscow, 2020. URL: <https://stroi.mos.ru/> (accessed: 02.03.2020). (In Russian)
16. *Moskovskiy koksogazovyy zavod: ofitsial’nyy sayt* [Moscow Coke and Gas Plant: official website]. Moscow, 2020. URL: <http://www.mechel.ru/sector/mining/mkz> (accessed: 04.02.2020). (In Russian)
17. Namiot D. Ye., Pokusayev O. N., Chekmarev A. Ye. (2018) Otsenka passazhiropotoka dlya novykh liniy zheleznoy dorogi v Moskovskom regione [Estimation of passenger traffic for new railway lines in the Moscow region]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 6, no. 10, pp. 22–28. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/149074652/> (accessed: 01.04.2020). (In Russian)
18. Namiot D. Ye., Pokusayev O. N., Lazutkina V. S. (2018) O modelyakh passazhirskeyego potoka dlya gorodskikh zheleznykh dorog [On models of passenger flow for urban railways]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 9–14. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/103469572/> (accessed: 05.02.2020). (In Russian)
19. Yaoli Wang, Di Zhu, Ganmin Yin, Zhou Huang & Yu Liu. (2020) A unified spatial multigraph analysis for public transport performance. *Institute of Remote Sensing and Geographical Information Systems – Scientific Reports*, vol. 10, no. 9573, pp. 1–15. URL: <https://www.pubfacts.com/detail/32532999/A-unified-spatial-multigraph-analysis-for-public-transport-performance> (accessed: 14.04.2020).
20. Mishchenko A. V., Sabatkoyev T. R. (2012) Otsenka effektivnosti investitsionnogo proyekta rasshireniya marshrutnoy seti gorodskogo transporta [Evaluation of the effectiveness of an investment project for expanding the route network of urban transport]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], vol. 22, no. 277,

- pp. 10–14. URL: <https://publications.hse.ru/articles/54865187> (accessed: 07.02.2020). (In Russian)
21. Xinhua Zheng, Wei Chen, Pu Wang, Dayong Shen, Songhang Chen, Xiao Wang, Qingpeng Zhang. (2016) *Big Data for Social Transportation*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 17, no. 3, pp. 620–630. URL: https://www.researchgate.net/publication/288246221_Big_Data_for_Social_Transportation (accessed: 06.05.2020).

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 26.06.2020, принята к публикации 17.07.2020*

ПОКУСАЕВ Олег Николаевич — кандидат экономических наук, директор научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» РУТ (МИИТ)
e-mail: o.pokusaev@rut.digital

ЧЕКМАРЕВ Александр Евгеньевич — заместитель директора научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» РУТ (МИИТ)
e-mail: a.chekmarev@rut.digital

ЕВСЕЕВ Виктор Сергеевич — специалист научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» РУТ (МИИТ)
e-mail: v.yevseev@rut.digital

ОВСЯННИКОВ Максим Львович — специалист научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» РУТ (МИИТ)
e-mail: m.ovsiannikov@rut.digital

КОЖЕМЯКИНА Ксения Александровна — специалист научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» РУТ (МИИТ)
e-mail: x.kozhemyakina@rut.digital

© Покусаев О. Н., Чекмарев А. Е., 2021
© Евсеев В. С., Овсянников М. Л., Кожемякина К. А., 2021

УДК 629.043

К. А. Иванова

Д. Н. Левин, канд. техн. наук

М. В. Шкурин

*Кафедра «Проектирование и сертификация авиационной техники»,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*

МАТРИЦА БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕРЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ ДЕЙСТВИЙ ПИЛОТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ В ОСОБОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПОЛЕТНОГО ЗАДАНИЯ

Рассматривается создание матрицы базы данных (МБД) как инструмента, направленного на прогнозирование нерегламентированных действий летного экипажа, выявление резервных психофизиологических возможностей пилотов гражданской авиации в известной или прогнозируемой особой ситуации.

Под МБД понимается совокупность данных исследуемых объектов с определенным множеством характеристик, сгруппированных по их функциональному назначению в многомерные множества. Они предназначены для диагностики функциональных состояний данных объектов в рамках шаблонов известных систем и являются источником или основой для создания документа с заданными архитектурой, структурой и параметрами.

В статье приведены схема матрицы базы данных и мониторинга психофизиологического и функционального состояния пилотов гражданской авиации в особой ситуации при выполнении полетного задания. Структура МБД состоит из пяти основных блоков:

- блока регистрации основных данных пилотов (информация первого порядка);
- блока текущей информации о пилотах (информация второго порядка);
- блока формирования списков необходимых аппаратных диагностик;
- блока формирования заключений и рекомендаций по результатам исследований деятельности летного экипажа в известной особой ситуации;
- блока общего промежуточного/итогового заключения по прогнозированию поведения пилотов в особой ситуации при выполнении полетного задания.

Даны основные расчеты для анализа информации, поступающей в МБД, перечислены основные методики психофизиологических и психолингвистических исследований. Определен перечень основных характеристик для формирования общих промежуточных или итоговых заключений по прогнозу поведения пилота в известной или прогнозируемой особой ситуации, включающий в себя характеристики надежности, временные и антропометрические характеристики пилотов. В качестве основных психолингвистических единиц принимаются индикаторы и маркеры, составляющие определенный список, характерный для каждого пилота. Описаны психомоторные реакции и реакция отрицания на события, происходящие в период известной или прогнозируемой особой ситуации.

Показано, что раннее выявление неблагоприятных психофизиологических состояний с помощью матрицы базы данных у пилотов гражданской авиации позволяет своевременно – как психофизиологически, так и технологически – скорректировать поведение пилота и повысить эффективность выполнения полетных заданий в условиях агрессивной профессиональной среды и возникновения особых ситуаций.

Матрица базы данных, психофизиологическое состояние, функциональное состояние, психолингвистические характеристики, особая ситуация, летный экипаж, пилот ГА, эффективность, полетное задание

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-67- 84

Введение

Человеческий ресурс является ключевым фактором не только в современной гражданской авиации, но и на протяжении всей истории отрасли. Реалии развития современных социально-экономических и технических направлений гражданской авиации таковы, что рациональное использование человеческих ресурсов становится прямым экономическим показателем работы авиационного предприятия. Профессиональная деятельность пилотов гражданской авиации требует превосходного знания техники, постоянного поддержания летных навыков, выдвигает серьезные требования к уровню психофизиологической подготовки и функциональным возможностям пилота. При выполнении полетного задания в особых ситуациях работа экипажа осуществляется на психофизиологических пределах человека.

Любая особая ситуация в полете предполагает не только четкое выполнение алгоритма по разрешению этой ситуации, предписанного специальной литературой, но и осознание того, что любое принятое решение ведет к серьезным последствиям. Следовательно, каждое решение летного экипажа должно быть осознанным и адекватным, с прогнозированием последующих действий [1].

В связи с высоким темпом развития авиационной техники, усложнением ее технических систем профессиональные требования к психофизиологическим показателям и состояниям летного экипажа при выполнении полетного задания в особых ситуациях возрастают в геометрической прогрессии. Многочисленные психологические, биологические, технические, физиологические, математические исследования [2, 4, 5, 7, 8, 15, 17–25] направлены на выявление резервных психофизиологических возможностей пилотов гражданской авиации для эффективного и своевременного разрешения особых ситуаций. Темой этих работ становится также сокращение периода восстановления работоспособности после больших профессиональных нагрузок и высокого эмоционального напряжения [2].

Пилоты гражданской авиации – высокопрофессиональные специалисты авиационно-технического комплекса и ключевое звено при принятии решения в особых ситуациях.

Поскольку открываются новые маршрутные сети, увеличивается объем грузовых и пассажирских перевозок, серийное производство новых воздушных

судов гражданской авиации, рынок вакансий пилотов постоянно нуждается в притоке новых высококвалифицированных кадров. Качество здоровья пилотов напрямую влияет на выполнение полетного задания в целом и разрешение особой ситуации в частности.

Несмотря на строгий отбор, многие члены летного экипажа постоянно испытывают высокое эмоциональное напряжение и расстройство некоторых личностных качеств, а также «профессиональное выгорание» — независимо от возраста и налета часов. При этом доля человеческого фактора в отказах сложных технических систем продолжает расти. Примером этому могут служить происшествия, где ошибочные действия экипажей имели катастрофические последствия. Эти катастрофы показывают степень ответственности пилотов за принятие решений в особых ситуациях.

Постановка задачи

Причины, влияющие на возникновение ситуаций, в которых допускаются ошибки и предаварийные действия, приводящие к аварийным или катастрофическим последствиям, можно разделить на две категории:

1) неустойчивое психофизиологическое состояние летного экипажа — эмоциональная перевозбуждение (состояние агрессии или эйфории), плохое самочувствие, гиперответственность, чрезмерная самоуверенность, нарушение работы физиологических систем организма (кардиореспираторной системы, центральной нервной системы), усталость организма (переутомление, снижение умственной, физиологической работоспособности);

2) неоптимальное эргономическое рабочее пространство — временная потеря пространственной ориентации в связи со сменой типа воздушного судна, период адаптации при смене рабочего места (слева/справа), смена компьютерных программ (обновление установленных или применение новых), расположение приборов и индикаторов, рабочих поверхностей, аудиосистем предупреждения, расстояние до основных органов управления ВС.

Таким образом, несмотря на профессиональный отбор и постоянное совершенствование кабин летных экипажей, очевидна необходимость в постоянном мониторинге психофизиологического состояния пилотов и совершенствовании эргономического рабочего пространства.

Задача исследования — создание инструмента, который позволил бы выявлять неблагоприятные психофизиологические состояния пилотов с целью дальнейшего прогнозирования их действий в особых ситуациях.

Методы решения

В качестве решения задачи контроля психофизиологического состояния экипажа целесообразно создание специализированного комплекса матрицы базы

данных (МБД) для прогнозирования нерегламентированных действий пилотов гражданской авиации в особой ситуации при выполнении полетного задания.

Под определением матрицы понимается совокупность всех данных исследуемых объектов с определенным множеством характеристик. Они сгруппированы по функциональному назначению в многомерные множества для диагностики функциональных состояний пилотов в рамках шаблонов известных систем, подготовки и создания документов с заданными параметрами. МБД характеризуется своей уникальной архитектурой, структурой и параметрами.

В основе функционирования такой матрицы — методы психофизиологических и психолингвистических исследований, теории вероятностей, математической статистики, анализа антропометрических данных. Для получения результатов используется математическое моделирование, эмпирические методы исследований, статистические методы анализа и основные методы научного сбора и обработки информации [3].

Психофизиологические методы наиболее точно определяют функциональное состояние пилота и течение большинства физиологических процессов, обеспечивающих психическую деятельность человека. Психолингвистические выявляют физиологическую реакцию организма и позволяют анализировать речевые реакции с целью обнаружения связей между единицами речи.

Методы теории вероятностей и математической статистики помогают изучить случайные явления в особых ситуациях и обнаружить их статистические закономерности, чтобы прогнозировать подобные происшествия в дальнейшем.

Анализ антропометрических данных дает возможность определить наиболее подходящие эргономическое пространство кабины пилотов ГА. С помощью эмпирических методов исследования, статистических методов анализа и математического моделирования можно прогнозировать действия летного экипажа в известных особых ситуациях и выявлять алгоритм действий при неизвестной особой ситуации.

Комбинация методов направлена на создание комплекса для решения всех этих задач.

Описание результатов

Матрица базы данных является основным компонентом создаваемого комплекса программ по автоматизации процессов анализа действий пилотов в особых ситуациях при выполнении полетов. Под реализацией МБД понимается внедрение системы программ в организационную структуру прогнозной базы по обеспечению безопасности полетов, в основе которой лежит совокупность данных исследуемых объектов с определенным множеством характеристик. Они сгруппированы по функциональному назначению в многомерные множества для оптимизации и автоматизации существующего комплекса по обеспечению безопасности полетов на авиационных предприятиях. Матрица включает в себя

блоки, модули и основные исследования по психофизиологическому и психолингвистическому тестированиям (представлена на рис. 1).

Блок 1 – регистрация основных данных пилотов (информационные, психофизиологические, функциональные), занесение основной профессиональной информации (ВО, обучение и т.д.), формирование и ведение списка психолингвистических единиц (СПЕ), характерных для каждого пилота, ведение списка отработки сессий по особым ситуациям с занесением всех необходимых маркеров и индикаторов, процедура проведения предварительного статистического анализа по пилоту.

Блок 2 – информация второго порядка (текущая) о пилотах, проведение анализов и диагностик, исследований общего характера, исследования общих психофизиологических данных и функционального состояния, промежуточные заключения и рекомендации.

Блок 3 – формирование списка необходимых аппаратных диагностик (с обязательным указанием измерений: «идеальный индикатор», норма, отклонения), описание процедур психофизиологического и психолингвистического исследования без отрыва от основной деятельности, добавление/удаление необходимых процедур/исследований и их обоснование.

Блок 4 – формирование заключений и рекомендаций по проведению дальнейших диагностик и исследований, результаты анализа общих психофизиологических данных и функционального состояния.

Блок 5 – общее промежуточное/итоговое заключение по прогнозу поведения пилота в известной особой ситуации.

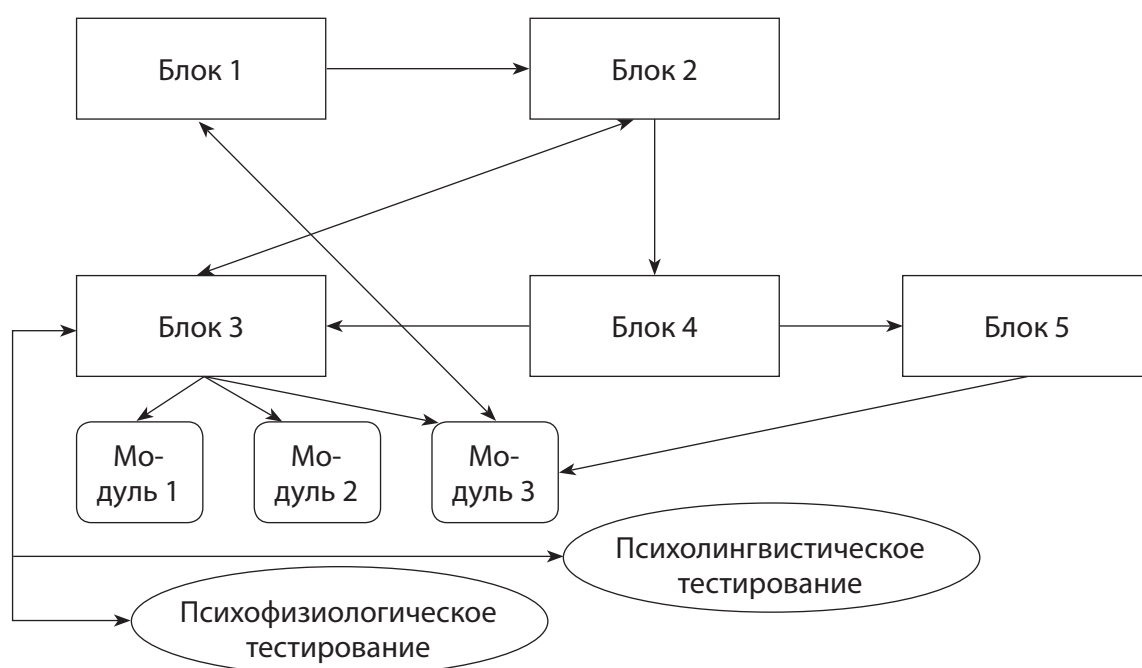


Рис. 1. Структурная схема МБД и информационные потоки между блоками и модулями

Блок 3 содержит два основных направления исследований:

- 1) психофизиологическое тестирование;
- 2) психолингвистическое тестирование.

Данные тестирования нужны, чтобы анализировать информацию из других блоков для сравнения с «идеальными» показателями и выявления отклонений, определять и формировать список необходимых методов при проведении эксперимента или полевого исследования для определенной известной особой ситуации.

Основные психофизиологические показатели работоспособности пилотов ГА – быстродействие, точность, надежность и психическая напряженность, а также соотнесение данных показателей с требованиями, предъявляемыми к эргономическому пространству кабины [4].

Соответственно, основными методиками психофизиологического тестирования являются [5–8]:

- 1) методика простой зрительно-моторной реакции;
- 2) методика «Реакция на движущийся объект»;
- 3) методика развития простой и сложной двигательной реакции;
- 4) методика «Реакция различия»;
- 5) методика «Реакция выбора»;
- 6) методика теппинг-теста;
- 7) методика определения развития координации;
- 8) методика «Помехоустойчивость».

Комплексная психофизиологическая методика позволяет прогнозировать эмоционально-психическое состояние и психофизиологические свойства и функции пилота гражданской авиации в особых ситуациях [6]. С ее помощью можно проследить процессы и состояния пилота в особой ситуации:

- психологический и психофизиологический статус и его оценку;
- профессиональные качества, их применение и развитие;
- внешние психофизиологические проявления индивидуальных особенностей личности (речь, поведение, моторно-двигательные реакции);
- внутренние особенности личности (психические свойства и состояния, особенности протекания психических процессов);
- психомоторные свойства;
- нейродинамические свойства.

Психолингвистическое тестирование проводится с помощью:

- 1) методики выявления уровня вербальной дифференциации пилота ГА;
- 2) методики построения списка психолингвистических единиц, характерных для определенного пилота;
- 3) методики определения голосовых характеристик речи пилота ГА (тип, высота, скорость, сила).

На основании психолингвистического тестирования создают список психолингвистических единиц, базирующийся на индикаторах и маркерах, которыми

определяются три основных состояния пилота в особой ситуации: «идеальное состояние», «норма», «отклонение». Этот перечень — одно из ключевых значений МБД.

Реакция пилота на происходящую особую ситуацию может быть двух типов:

- 1 — психомоторная;
- 2 — состояние отрицания.

Прогнозирование таких реакций, как психомоторная [7, 8] и состояние отрицания, может быть осуществлено при помощи информационных характеристик следующих анализаторов [9, 10]:

- 1 — зрительного;
- 2 — слухового;
- 3 — моторного;
- 4 — характеристики памяти и оперативного мышления;
- 5 — управляющих действий — рабочих движений.

В блоке 5 при формировании общих заключений по прогнозу поведения пилота в известной особой ситуации основными являются:

1) характеристики надежности — реакции пилота на особые ситуации, выраженные в психофизиологических и психолингвистических показателях, общем функционировании;

2) временные характеристики — скорость реакции (норма и отклонения для определенного пилота в сравнении с «эталонными» показателями);

3) антропометрические характеристики — динамические (определение объема рабочих зон, зоны досягаемости и видимости) и статические (определение диапазона изменения в случае регулировки параметров рабочего места).

1. *Характеристики надежности.* Взаимодействие пилота и машины — главная составляющая управления безопасностью полета. При оценке надежности системы необходимо учитывать и анализировать оба этих элемента. При этом введение нового индикатора или характеристики для оценки надежности снижает ее показатель, если только составляющая не характеризует неизменно надежный элемент [11].

Вероятность безотказной работы пилота $r = 1,00$ при условии, что учитываются только факторы отказа аппаратуры или воздушного судна в целом и нет связи с действиями летного экипажа.

Взаимный перерасчет характеристик надежности, полученных при различных установках на выполнение работы, производится по приближенным формулам [12]:

$$P_{jc} = 1 - \sqrt{0,5(1 - P_{j\bar{o}})},$$

$$P_{j\bar{o}} = 1 - 2(1 - P_{jc})^2,$$

где P_{jc} и P_{jb} — соответственно вероятность безошибочного выполнения j -действия при установке на скорость и безошибочность работы.

Чтобы получить доверительный интервал для вероятности P_j , следует использовать результаты экспериментальной оценки по формуле:

$$\sum_{i=N_j-n_j}^{N_j} C_j^N j P^i (1-P)^{N-1} = 1 - \alpha,$$

где α — достоверность того, что истинная вероятность P_j лежит в интервале от P до 1; P — нижняя граница вероятности безошибочной работы.

При достоверности $\alpha = 0,8$ результаты расчета P приведены в таблице 1.

Таблица 1. Требуемое число опытов при исследовании надежности

Уровень надежности (вероятность безошибочной работы)	Предельно допустимая погрешность определения вероятности	Предельно допустимая ошибка репрезентативности	Число опытов, необходимое для обеспечения требуемой точности определения вероятности
10^{-1}	$0,5 \cdot 10^{-1}$	$0,25 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^2$
10^{-2}	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,25 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^3$
10^{-3}	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^4$
10^{-4}	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^5$

Под уровнем надежности понимается вероятность безошибочной работы, т. е. выполнение отдельной операции или алгоритма работы в целом.

Надежность деятельности пилота характеризуется вероятностью правильного решения:

$$P_n = \frac{m}{N},$$

где m — число правильных решений; N — общее число решаемых задач.

2. Временные характеристики. Для определения времени выполнения конкретной операции пилотом в кабине гражданского пассажирского самолета можно использовать известные данные [13], но остальные недостающие временные характеристики получают только опытным путем. Для фиксации моментов начала и окончания каждого действия необходимо применение специальных приемов, основанных на экспериментальных и аналитических методах [5].

Рисунок 2 отображает структурную схему деятельности пилота в зависимости от того, какая реакция следует на информационный сигнал — немедленное действие или отложенное.

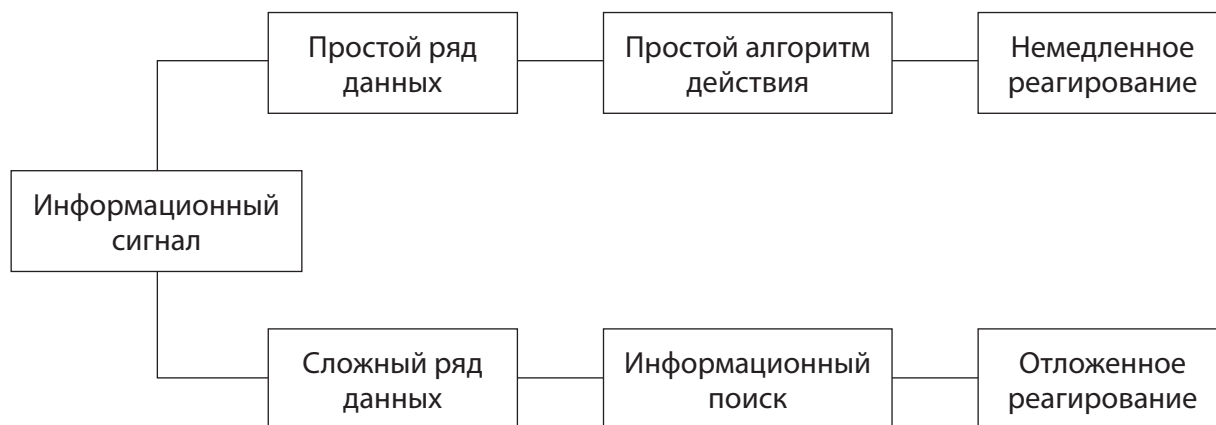


Рис. 2. Структурная схема деятельности с немедленным и отложенным реагированием

Быстродействие будет определяться по формуле [14]:

$$\tau = a + bI,$$

где I — количество перерабатываемой информации, a — время от момента появления сигнала до реализации решения, b — время на обработку единицы информации.

Если реакция на информационное событие или сигнал отложенная, следует учесть время ожидания сигнала, затраченное пилотом на его обработку. Тогда быстродействие пилота определяется по формуле:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{оп}} + \tau_{\text{ож}},$$

где $\tau_{\text{пр}}$ — время пребывания информации на обслуживании, $\tau_{\text{оп}}$ — время обслуживания (обработки) сигнала, $\tau_{\text{ож}}$ — время ожидания начала обслуживания.

Далее делается выборка m задач. Каждая задача, в свою очередь, разбивается на m различных, но одинаковых для каждой задачи типов элементарных действий. Число действий j -го вида в i -й задаче обозначим a_{ij} . Тогда среднее значение времени решения i -й задачи равно

$$\alpha_{i1}\tau_1 + \alpha_{i2}\tau_2 + \dots + \alpha_{im}\tau_m = T_i,$$

где τ_j — среднее значение времени выполнения j -го элементарного действия ($j = 1, 2, \dots, m$).

Близок к рассмотренному цикловой метод хронометрирования. Для определения времени выполнения отдельных действий объединяем их в группы по три действия в каждой:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = t_1,$$

$$\tau_4 + \tau_1 + \tau_2 = t_2,$$

$$\tau_3 + \tau_4 + \tau_1 = t_3,$$

$$\tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = t_4,$$

где $\tau_1, \dots, \tau_4$ — средние значения времени выполнения отдельных действий; $t_1, \dots, t_4$ — средние значения продолжительности выполнения объединенных групп действий, эти значения получаются из эксперимента.

Искомые величины:

$$\tau_1 = k - \tau_4; \tau_2 = k - \tau_3; \tau_3 = k - \tau_2; \tau_4 = k - \tau_1,$$

где k — величина, определяемая из выражения

$$k = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}.$$

Необходимо учесть, что временные характеристики, полученные для нормальных условий работы пилота при установке на максимальную скорость выполнения действий, всегда будут отличаться от временных характеристик, полученных в реальном полете и на тренажерах. Однако их сравнение и анализ позволяют спрогнозировать возможные временные характеристики с минимальными отклонениями в реальном полете.

3. Антропометрические характеристики. Для записи алгоритма описания деятельности пилота [15, 16] будем использовать форму логической схемы алгоритма, как показано на рисунке 3.

Антропометрические характеристики с применением методов соматографического анализа, проектографии и аналитических методов [13] позволяют не только выбрать рабочую позу пилота и спроектировать оптимальное рабочее место, обосновав моторные и сенсорные данные, но и выявить индивидуальные характеристики, способные повлиять на психофизиологическое состояние пилота в особой ситуации. Своевременная информация о соответствии индивидуальных характеристик возможностям приборов и рабочего пространства кабины помогает найти оптимальное решение о дальнейших корректировках психофизиологического состояния и эмоционального напряжения.

В таблице 2 даны рекомендации по учету антропометрических характеристик при выполнении проектных работ.

Выводы

Предложенная схема матрицы базы данных предназначена для проведения исследования психофизиологического и функционального состояния летно-

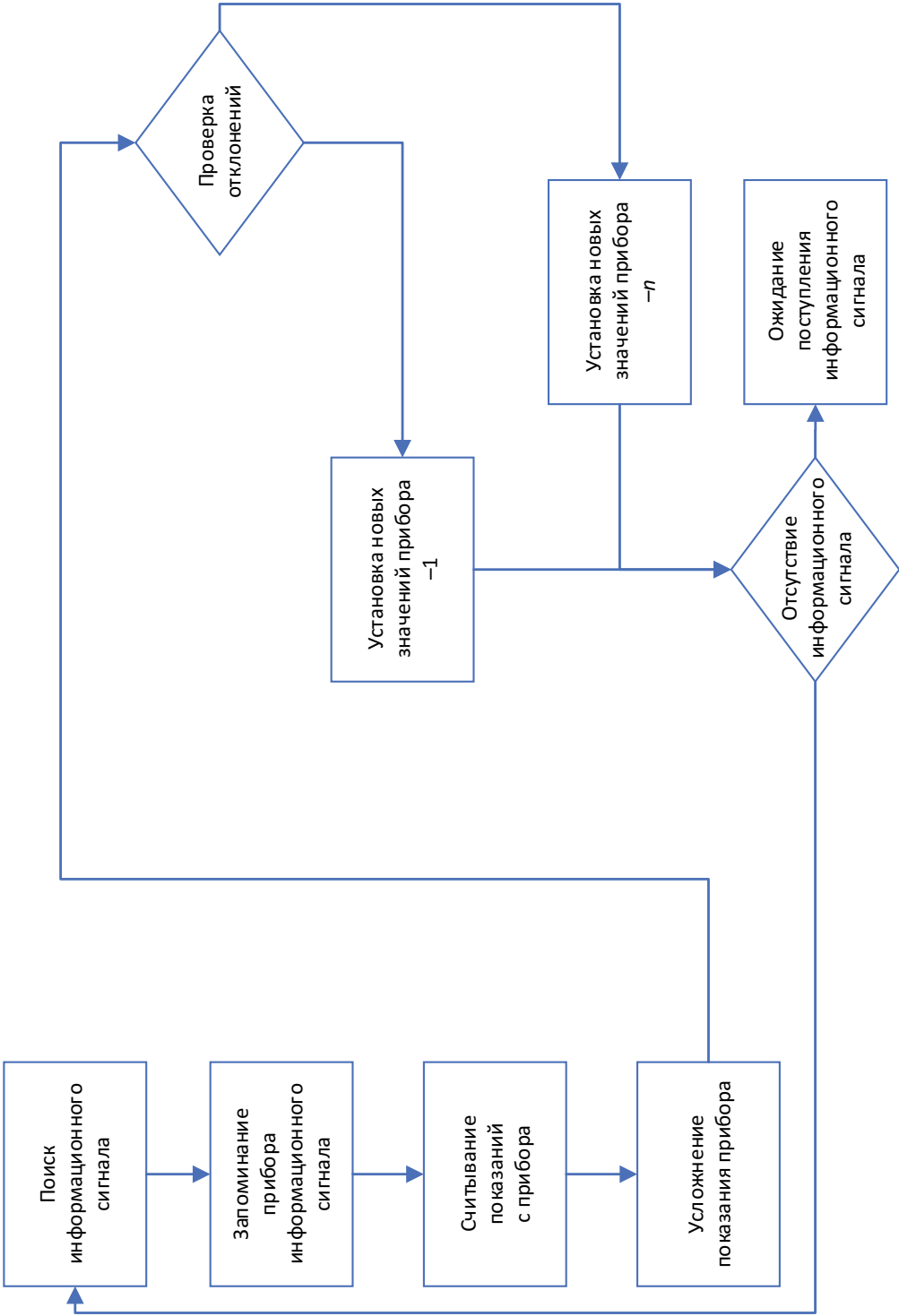


Рис. 3. Форма логической схемы записи деятельности пилота

Таблица 2. Рекомендации по антропометрическим характеристикам

Характеристики	Практические исследования
Амплитуда движений головы	Для определения зон видимости и обзора
Амплитуда движений руки	Для определения углов перемещения вращающихся и поворотных переключателей
Зоны досягаемости	Для определения размеров мониторного поля
Размеры руки	Для обеспечения удобства обслуживания и доступа к элементам оборудования
Размеры туловища	Для расчета минимальных пространств, занимаемых человеком
Габаритные размеры	Для расчета минимальных пространств, занимаемых человеком; минимальных расстояний между пилотами; размеров проемов, проходов, люков и лестниц

го экипажа и эргономического пространства рабочего места. Включает в себя визуальные стимулы, соотнесение антропометрических характеристик с рекомендованными для проектных и инженерных решений, измерение скорости реакции на изменения показаний приборов и индикаторов.

Это позволяет:

- контролировать психофизиологическое состояние летного экипажа в процессе отработки особой ситуации и соотносить полученные показатели с аварийными/катастрофическими происшествиями для дальнейшего анализа, получать результаты по совершенствованию методики подготовки;
- получать экспертное заключение о допуске летного экипажа/пилота, а также о психофизиологическом состоянии экипажа в особой ситуации при выполнении полетного задания;
- строить модели поведения пилота в прогнозируемой/известной особой ситуации;
- определять и формировать базы данных индивидуальных моделей поведения и функционального состояния пилотов гражданской авиации в особых ситуациях при выполнении полетного задания;
- корректировать индивидуальное психофизиологическое поведение пилота и его функциональное состояние в особых ситуациях;
- создавать и вести базу данных психофизиологического и функционального состояния пилотов гражданской авиации с целью предупреждения и прогнозирования их действий в особых ситуациях при выполнении полетного задания;
- выявлять резервные психофизиологические возможности пилотов гражданской авиации в известной/прогнозированной особой ситуации;

- определять инструменты, способствующие сокращению периода восстановления нормальной работоспособности летного экипажа после профессиональных нагрузок и высокого эмоционального напряжения;
- составлять список психолингвистических единиц.

В работе предложены практические рекомендации по организационной структуре и компонентному составу матрицы базы данных как части комплекса прогнозной базы по обеспечению безопасности полетов в рамках прогностического подхода к деятельности летного экипажа в известной/прогнозируемой особой ситуации. Это необходимо для автоматизации и оптимизации действий по отбору пилотов на этапе формирования летного экипажа и на этапе расчета оптимальных действий для конкретного экипажа/пилота в процессе реального полета и отрабатываемого на тренажерах в специальных сессиях.

Представлена оригинальная концепция оценки психофизиологического состояния пилотов через прогноз их деятельности с учетом психолингвистических единиц. Она получена на основе психофизиологического и психолингвистического тестирования, входящих в структуру блоков модели матрицы базы данных, и является одним из ключевых элементов создаваемого комплекса программ по автоматизации и оптимизации организационной структуры системы обеспечения управления безопасностью полетов на авиационном предприятии в рамках прогностического подхода.

Библиографический список

1. *Титков О. С., Сизов П. С., Матухнова Н. С.* Эвристики человека в моделях принятия решения. Труды ГОСНИИАС. Серия: Вопросы авионики. Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (Москва). – 2017. – № 2 (31). – С. 3–26.
2. *Bor R., Eriksen C., Oakes M. & Scragg P (Eds.)* (2017). Pilots mental health assessment and support: A practitioner's guide. Oxon: Routledge.
3. *Колетвинов Д. С.* Обзор научных методов сбора и обработки информации / Д. С. Колетвинов, А. А. Мельникова, К. В. Борзилов // Молодой ученый. – 2020. – № 3 (293). – С. 157–159.
4. *Бубеев Ю. А., Усов В. М., Сергеев С. Ф., Крючков Б. И., Михайлюк М. В., Йоханнес Б.* Итоги космического эксперимента «ПИЛОТ-Т» для моделирования взаимодействия в системе «человек-робот» на лунной поверхности. АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА. Институт медико-биологических проблем РАН (Москва). – 2019. – Т. 53. – № 7. – С. 65–75.
5. *Baumeister A. A., & Kellas G.* Reaction time and mental retardation. In N. R. Ellis (Ed.), International review of research in mental retardation. Vol. 3. New York: Academic Press, 1968.
6. *Stanton, N.* Engineering Psychology: Another Science of Common Sense? (1996), The Psychologist. – No. 9 (7). – Pp. 300–303.
7. *Chernorizov A. M., Isaychev S. A., Zinchenko Yu. P., Znamenskaya I. A., Zakharov P. N., Khakhalin A. V., Gradoboeva O. N., Galatenko V. V.* Psychophysiological methods for the diagnostics of human functional states: New approaches and perspectives. Psychology in Russia: State of the Art. – 9 (4). – Pp. 23–36, January 2016.

8. *Charissa Freese, Rene Schalk* Implications of differences in psychological contracts for Human Resources Management, *European Journal of Work and Organizational Psychology*. – No. 5 (4): Pp. 501–509. – December 1996.
9. *Лебедева Н. Н., Каримова Е. Д.* Акустические характеристики речевого сигнала как показатель функционального состояния человека. *Успехи физиологических наук*. Издательство: Российская академия наук (Москва). – Т. 45. – № 1. – 2014. – С. 57–95.
10. *Angelica N.* Thinking and Recollecting: Psychological Memory, Personal History, and Subjectivity, Memory, History, Justice. In: *Memory, History, Justice in Hegel*. Palgrave Macmillan, London. – 2012.
11. *Luis Miguel Munoz* Ergonomics in the Industry 4.0: Virtual and Augmented Reality. *Journal of Ergonomics*. – № 08 (05). – January 2018.
12. *Справочник по инженерной психологии/Под ред. Б. Ф. Ломова.* – М.: Машиностроение. – 1982. – 368 с.
13. *Новиков В. В.* Основы инженерной психологии и эргономики. Учебное пособие. Волгоград: Издательство Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – 144 стр.
14. *Основы инженерной психологии. Учеб. пособие. Под ред. Б. Ф. Ломова.* М., «Высш. школа». – 1977.
15. *Yuan Cao, Zhibo Yuan, Wentao Wu* The Preliminary application of Observer XT in the Study of Crew Error, Conference: 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), July 2019.
16. *Смоляров А. М.* Системы отображения информации и инженерная психология. Учеб. пособие. – М.: Высш. школа. – 1982. – 272 с.
17. *Макарова В. В.* Особенности профессионального психологического отбора летного состава гражданской авиации. *Экстремальная психология: теория и практика. Сборник научных статей/Под ред. А. В. Кокурина, В. И. Екимовой, Е. А. Орловой.* – Москва. – 2017. Издательство: ООО «РУСАЙНС».
18. *Пономаренко В. А.* Наука о человеке в авиации XXI столетия. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. Издательство: Институт медико-биологических проблем РАН (Москва). – Т. 40. – № 6. – 2006. – С. 54–59.
19. *Гандер Д. В., Алексеенко М. С.* Личностный потенциал летчика: от теории к практике. Монография. Издательство Современного гуманитарного университета (Москва). – М.: 2012. – 157 с.
20. *Козлов В. В.* Потенциал надежности пилота: компоненты и их развитие. *Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики.*//Под ред. А. А. Обознова, А. Л. Журавлева. Москва, 2018. Издательство: Институт психологии РАН. – 2018. – С. 253–290.
21. *Erland Svensson, Glenn F. Wilson* Psychological and Psychophysiological Models of pilot Performance for Systems Development and Mission Evaluation, *The International Journal of Aviation Psychology*. – Vol. 12. – 2002. – Issue 1. – Pp. 95–110.
22. *Miroslav Jirgl, Jan Boril, Rudolf Jalovecky.* The identification possibilities of the measured parameters of an aircraft model and pilot behavior model on the flight simulator, Conference: 2015 International Conference on Military Technologies (ICMT). May 2015.
23. *Kacer Jiri,* Modelling of the pilot behavior, Conference: 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). May 2017.
24. *D. W. Babka,* Flight Testing in a Simulation Based Environment, San Luis Obispo, 2014.

25. *M. van der Vlugt, P.A. Wieringa*, Training aircrews to recover from human error: a proposal for a training outline, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583). 10–13 Oct. 2004. The Hague, Netherlands.

K. A. Ivanova
D. N. Levin, Ph. D.
M. V. Shkurin

Department Aircraft Design and Certification
Moscow Aviation Institute (National Research University)

THE MATRIX DATABASE FOR PREDICTING UNREGULATED ACTIONS OF THE FLIGHT CREW IN THE INFLIGHT ABNORMAL CIRCUMSTANCES DURING THE FLIGHT MISSION

This paper presents a design of the matrix database (MDB) as the tool for predicting the unregulated actions of the flight crew, identifying the reserve psychophysiological capabilities of the pilots in the inflight abnormal or predicted circumstances during the flight mission.

MDB means data collection of the studied objects with a certain set of characteristics, grouped according to their functional purpose into multidimensional sets, designed to diagnose the functional states of these objects within the templates of known systems and are the source or basis for creating a document with the given architecture, structure and parameters.

In this paper, the authors present a design of the matrix database and monitoring of the flight crew psychophysiological state and functional status in the inflight abnormal circumstances during the flight mission.

The MBD structure is presented, which consists of 5 main blocks:

- registration of the basic pilot data (first-order information)
- current pilot information (second-order information)
- generating lists of necessary hardware diagnostics
- generating conclusions and recommendations based on the results of research on the activities of the flight crew in a known special situation;
- general intermediate/final conclusion on predicting the behavior of the pilots in the inflight abnormal circumstances during the flight mission.

The main calculations for the analysis of the information received in the MBD are given and the main methods of psychophysiological and psycholinguistic research are listed. A list of the main characteristics for the formation of general intermediate or final conclusions on the forecast of the pilot's behavior in a known or predicted special situation, including the characteristics of reliability, time and anthropometric characteristics of pilots, is defined. The main psycholinguistic units are indicators and markers that make up a specific list that is specific to each pilot. Psychomotor reactions and the reaction of denial to events occurring during a known or predicted special situation are described.

It is shown that using the matrix database for early identification of the negative psychophysiological state of the flight crew allows psychophysiological and technological adjustment of the pilot's behavior in time and increases the efficiency of a flight mission in the condition of the inflight abnormal circumstances and an aggressive professional environment.

Matrix database, psychophysiological state, functional status, characteristics, inflight abnormal circumstances, flight crew, commercial pilot, efficiency, flight mission

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-67- 84

References

1. Titkov O. S., Sizov P. S., Matukhnova N. S. (2017) Jevristiki cheloveka v modeljah prinjatija reshenija [Human Heuristics in the models of decision making]. *Trudy gosniias. serija: voprosy avioniki*. [Proceedings of State Research Institute of Aviation Systems. Series: avionics questions]. Moscow, State Research Institute of Aviation Systems Publ., no. 2 (31), pp. 3–26. (In Russian)
2. Bor R., Eriksen C., Oakes, M., Scragg, P. (Eds.) (2017) *Pilots mental health assessment and support: A practitioner's guide*. Oxon, Routledge Publ.
3. Koletvinov D. S., Melnikova A. A., Borzilov K. V. (2020) *Obzor nauchnyh metodov sbora i obrabotki informacii* [Review of scientific methods of information collection and processing]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], no. 3 (293), pp. 157–159. (In Russian)
4. Bubeyev Yu. A., Usov V. M., Sergeev S. F., Kryuchkov B. I., Mikhailuk M. V., Johannes B. (2019) Itogi kosmicheskogo jeksperimenta «PILOT- T» dlja modelirovaniya vzaimodejstviya v sisteme «chelovek-robot» na lunnoj poverhnosti [Results of the space experiment “PILOT-T” for modeling interaction in the system “man-robot” on the lunar surface]. *Aviakosmicheskaja i jekolo-gicheskaja medicina* [Aerospace and environmental medicine]. Moscow, Institute of Medical and Biological Problems Publ., vol. 53, no. 7, pp. 65–75. (In Russian)
5. Baumeister A. A., Kellas G. (1968) Reaction time and mental retardation. N. R. Ellis (Ed.). *International review of research in mental retardation*, vol. 3, New York, Academic Press Publ.
6. Stanton N. (1996) Engineering Psychology: Another Science of Common Sense? *The Psychologist*, no. 9 (7), pp. 300–303.
7. Chernorizov A. M., Isaychev S. A., Zinchenko Yu. P., Znamenskaya I. A., Zakharov P. N., Khakhalin A. V., Gradoboeva O. N., Galatenko V. V. (2016) Psychophysiological methods for the diagnostics of human functional states: New approaches and perspectives. *Psychology in Russia: State of the Art*, 9 (4), pp. 23–36, January.
8. Charissa Freese, Rene Schalk (1996) Implications of differences in psychological contracts for Human Resources Management. *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 5 (4), pp. 501–509, December.
9. Lebedeva N. N., Karimova E. D. (2014) Akusticheskie harakteristiki rechevogo signala kak pokazatel' funkcional'nogo so-stojaniya cheloveka [Acoustic characteristics of a speech signal as an index of a human functional condition]. *Uspehi Fiziologicheskikh Nauk* [Success of Physiological Sciences]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., vol. 45, no. 1, pp. 57–95. (In Russian)
10. Angelica N. (2012) Thinking and Recollecting: Psychological Memory, Personal History, and Subjectivity, Memory, History, Justice. *Memory, History, Justice in Hegel*., London, Palgrave Macmillan Publ.
11. Luis Miguel Munoz (2018) Ergonomics in the Industry 4.0: Virtual and Augmented Reality. *Journal of Ergonomics*, 08 (05), January.
12. Lomov B. F. (Ed.) (1982) *Spravochnik po inzhenernoj psihologii* [Handbook of engineering psychology]. Moscow, Mashinostroyenie [Mechanical engineering] Publ., 368 p. (in Russian)
13. Novikov V. V. (2015) *Osnovy inzhenernoj psihologii i jergonomiki* [Basics of Engineering Psychology and Ergonomics]. Textbook. Volgograd, Volgograd State technical university Publ., 144 p. (in Russian)
14. Lomov B. F. (Ed.) (1977) *Osnovy inzhenernoj psihologii* [Basics of engineering psychology] Textbook. Manual. Moscow, Higher School Publ. (in Russian)

15. Yuan Cao, Zhibo Yuan, Wentao Wu (2019) The Preliminary application of Observer XT in the Study of Crew Error. *Conference: 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, July.
16. Smolyarov A. M. (1982) *Sistemy otobrazheniya informacii i inzhenernaya psihologiya* [Information display systems and engineering psychology]. Textbook, Moscow, Higher School Publ., 272 p. (in Russian)
17. Makarova V. V. (2017) Osobennosti professional'nogo psihologicheskogo otbora letnogo sostava grazhdan-skoj aviatsii [Peculiarities of Professional Psychological Selection of Civil Aviation Flight Personnel]. *Jekstremal'naja psihologiya: teorija i praktika* [Extreme Psychology: Theory And Practice]. Collection of scientific articles. Ed. by A. V. Kokurin, V. I. Ekimova, E. A. Orlova, Moscow, BUSINESS, Ltd Publ. (in Russian)
18. Ponomarenko V. A. (2006) Nauka o cheloveke v aviatsii XXI stoletija [Science about a man in aviation of the XXI century]. *Aviakosmicheskaja i jekologicheskaja medicina* [Aerospace and Ecological Medicine]. Moscow, Institute of Medical and Biological Problems of RAS Publ., vol. 40, no. 6, pp. 54–59. (in Russian)
19. Gander D. V., Alekseenko M. S. (2012) *Lichnostnyj potencial letchika: ot teorii k praktike* [Personal potential of a pilot: from theory to practice]. Moscow, Publishing House of Modern Humanitarian University Publ., 157 p.
20. Kozlov V. V. (2018) Potencial nadezhnosti pilota: komponenty i ih razvitie [Potential of pilot reliability: components and their development]. *Aktual'nye problemy psihologii truda, inzhenernoj psihologii i jergonomiki* [Actual Problems of Labor Psychology, Engineering Psychology and Ergonomics]. Ed. by A. A. Oboznov, A. L. Zhuravlev. Moscow, Institute of Psychology RAS Publ., pp. 253–290. (in Russian)
21. Erland A. I. Svensson, Glenn F. Wilson (2002) Psychological and Psychophysiological Models of pilot Performance for Systems Development and Mission Evaluation. *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 12, iss. 1, pp. 95–110.
22. Miroslav Jirgl, Jan Boril and Rudolf Jalovecky (2015) The identification possibilities of the measured parameters of an aircraft model and pilot behavior model on the flight simulator. *Conference: 2015 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, May.
23. Kacer Jiri (2017) Modelling of the pilot behavior. *Conference: 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, May.
24. Babka D. W. (2014) *Flight Testing in a Simulation Based Environment*. San Luis Obispo Publ.
25. Van der Vlugt M., Wieringa P. A. (2004) Training aircrews to recover from human error: a proposal for a training outline. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, 10–13 Oct., The Hague, Netherlands.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
Д. В. Ефановым*

Поступила в редакцию 18.06.2020, принята к публикации 18.08.2020

ИВАНОВА Ксения Аркадьевна — специалист кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института
e-mail: ksavlad@gmail.com

ЛЕВИН Дмитрий Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института
e-mail: d.n.levin@mail.ru

ШКУРИН Максим Викторович — ст. преподаватель кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института
e-mail: m.shkurin@mai, maksmai33@gmail.com

© Иванова К. А., Левин Д. Н., Шкурин М. В., 2021

УДК 681.3.06-192

В. А. Смагин, докт. техн. наук*Кафедра метрологического обеспечения,**Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург*

ПОНЯТИЕ ОБРАТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО В СМЫСЛЕ ЗАПОЛНЕНИЯ КВАНТОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Известно оптимальное в смысле заполнения квантование информации, предполагающее для заданного распределения вероятностей нахождение оптимального временного кванта информации и минимальной величины математического ожидания времени для него – при условии, что кванты между собой разделяются постоянными заданными пробелами. В статье предлагается обратное квантование к данному, называемому нами прямым. В нем кванты фиксированы, известны заранее, а величины пробелов между квантами случайны, характеризуются распределением вероятностей. Сами кванты могут носить любой объектовый вид, не только информационный. Для формализации предложенного замысла исследуется пример обратного квантования для «тяжелого» распределения вероятностей – равномерного распределения. Рассмотрены парциальные составляющие квантования: информация, пробелы и количество циклов. Изучаются два варианта: при отсутствии и при наличии ошибок элементов квантов. Сделано заключение в пользу обратного квантования. Оно может найти более широкое применение на практике.

Квант, квантование, прямое и обратное, затраты, информация, пробел, минимум математического ожидания, распределение вероятностей

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1- 57-66

Введение

Процесс представления определенного количества информации в виде совокупности квантов называется квантованием информации. Первые основополагающие результаты решения класса задач оптимального квантования случайной величины получены в [1, 2]. В статье [1] решена задача теории ценности информации с учетом ее стоимости. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации в математической форме представлено в виде [2]:

$$M(x) = (x + c) \int_0^{\infty} \left(E\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right) f(z) dz, \quad (1)$$

где c — установленный постоянный пробел между квантами; x — величина кванта, E — наибольшая целая часть числа с недостатком; $f(x)$ — плотность вероятности случайного количества квантуемой информации Z . Данное квантование будет называться в дальнейшем прямым информационным квантованием. Оно производится с целью определения такой величины x_0 , при которой математическое ожидание $M(x_0)$ достигает минимального значения. Такое квантование отличается от [3, 4] и имеет другой смысл и приложение.

В отличие от прямого информационного квантования (1), вводится обратное оптимальное в смысле заполнения квантование информации. В математической форме оно имеет вид:

$$M(y) = (x_3 + y) \cdot \int_0^{\infty} \left(E\left(\frac{z}{y}\right) + 1\right) \cdot g(z) dz, \quad (2)$$

где $M(y)$ — математическое ожидание квантованной случайной величины $\dot{Y}$; определяемой плотностью вероятности величины пробела между квантами $g(y)$ при заранее заданной величине кванта информации x_3 .

Физическая интерпретация (1) авторами [2] была связана с информационным представлением плотности $f(x)$. В нашем понимании его можно трактовать более широко, в связи с некоторым продуктом, и лишь в частном случае — с информацией. Физическую интерпретацию (2) представим промежутком — пробелом между фиксированными заранее определенными величинами кванта продукта или информации.

В случае (1) величина пробела c задана из тактических, технических, организационных и других соображений. Она представлена фиксированной величиной.

В случае (2) необходима плотность вероятности величины пробела, при которой можно оптимальным образом удовлетворить требования минимума математического ожидания при квантовании. Отыскание или определение этой плотности не рассматривается в данной статье и должно разумно подбираться из практических соображений.

Примеры необходимости обратного квантования многочисленны и достаточно очевидны. Мы живем в период интенсификации дискретной математики. Продукты, явления, информация количественно нами представляются ограниченными рамками. Товары помещают в контейнеры и ящики, информацию — в книги, фильмы, файлы и т. д.

С таким представлением этих объектов мы связаны в жизни и науке. Наряду с объектовым, информационным квантованием при определенных или заданных пробелах между различными в более широком понимании «квантами» необходимо ввести квантование по величине промежутков, пропусков, пробелов между заданными величинами «квантов». Это поможет достичь наиболее выгодных, экономичных, безопасных и др. показателей качества. Для сравнения прямого и обратного квантования выбирается представление информационного процесса «тяжелым» для квантования вероятностным равномерным распределением.

1. Пример исследования с прямым и обратным квантованием

Объектовый случайный процесс задается равномерной плотностью вероятности:

$$f(x) = \text{dunif}(x, a, d), a = 0, b = 100 \text{ ед.}$$

Требуется выполнить **прямое квантование** с пробелами между квантами $c = 5$ ед.

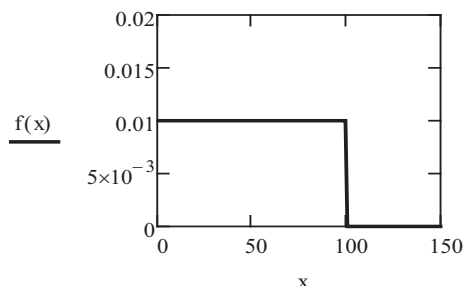


Рис. 1. Плотность вероятности квантованной случайной величины

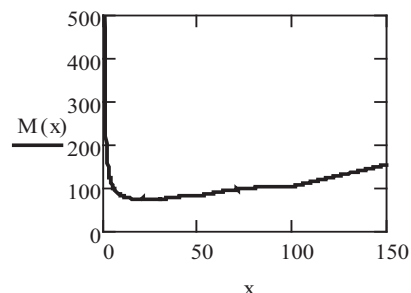


Рис. 2. Математическое ожидание квантованной случайной величины

На рисунке 1 представлена плотность вероятности, на рисунке 2 — математическое ожидание квантованной случайной величины. Математическое ожидание рассчитано по формуле (1). Оптимальная величина кванта и величина затрат видны из равенства $M(28) = 64.956$.

Используя выражение (1), определим парциальные затраты квантования по частным формулам из (1) при $c=5$:

$$\text{по информации } 28 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{28}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 64.856,$$

$$\text{для пробелов } 5 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{28}\right) + 1 \right) dz = 11.599,$$

$$\text{для циклов } \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{28}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 2.32.$$

Расчет количества циклов можно округлить до целого числа и не принимать во внимание. Число циклов — это число квантов в интеграле плюс дополнительный квант для непринятой информации в остатке квантования.

Поступая таким же образом и меняя величину пробела от 0 до 60, получим следующие значения для пробелов c , для оптимального кванта x_0 , для величины информации I , для величины пробелов Π , для количества циклов Π . Для работы с ними числовые данные сведены в таблицу 1.

Изучая данные таблицы, остановимся на последней строке и получим нужные затраты:

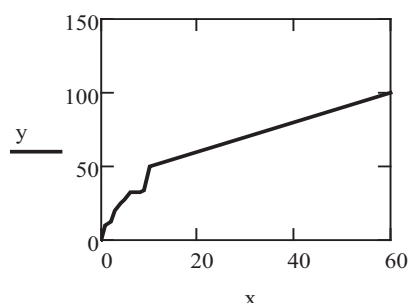
$$\text{по информации } 100 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 100,$$

по пробелам $60 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{100} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 60,$

по числу циклов $\int_0^{100} \left(\text{trunc} \left(\frac{z}{100} \right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 1.$

Итого: $100 + 60 = 160.$

При помощи MathCAD 12 [5] построим график зависимости величины оптимального кванта от величины пробела между квантами. График приведен на рисунке 3.



$A(t) = \text{linterp}(t, x, y).$

$\underline{x} := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 60)^T.$

$y := (0 \ 10 \ 12 \ 20 \ 25 \ 28 \ 32 \ 33 \ 33 \ 33.3 \ 50 \ 100)^T *$

Рис. 3. Зависимость величины оптимального кванта от величины пробела между квантами

Таблица 1. Значение квантованной случайной величины

c	x_0	И	П	Ц
0	0	0	0	0
1	10	55	5.5	5.5
3	20	60	9	3
4	25	62.5	10	2.5
5	28	64.956	11.599	2.32
6	32	66.55	12.478	2.08
7	33	66.663	14.141	2.02
8	33	66.663	16.161	2.02
9	33	66.663	18.181	2.02
10	33.3	66.6	20	2.02
20	50	69.126	30	1.5
30	50	75	45	1.5
50	50	75	75	1.5
60	60	100	100	1

Предельная величина пробела равна 60.

Она отвечает нашему заключению. Если принять $c = 60$, то можно выполнить один цикл с оптимальным квантом 100 единиц и потратить в нем на пробел 60 единиц. Задача квантования будет решена за один цикл.

Решение задачи обратным квантованием

Принимаем следующие данные:

$x_0 = 20$ ед., $y = 0, 1 \dots 100$, $n = 9$ ед., $\delta = 3$ ед., $g(y) = \text{dnorm}(y, n, \delta)$, $d = 9$. Выражение для решения задачи принимает вид:

$$N(y) = (x_0 + d) \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{y}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz. \quad (3)$$

На рисунках 4 и 5 представлены плотность вероятности и функция, обратная квантования.

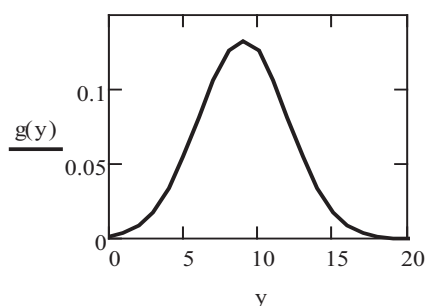


Рис. 4. Плотность вероятности, обратной квантованию

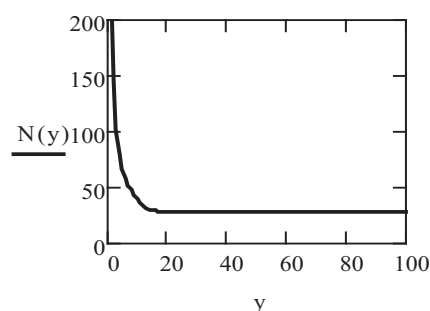


Рис. 5. Функция вероятности, обратной квантованию

$$N(19.9) = 28.958, N(20) = 28.957, N(100) = 28.957.$$

За минимальное значение кванта примем $y_0 = 20$ ед и вычислим парциальные затраты:

по информации $20 \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 19.971,$

по пробелам $\int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 0.999,$

по числу циклов $\int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 0.999.$

Итого за одну пересылку кванта $x_0 = 20$ ед. имеем $19.991 + 8.987 = 28.958$. На полную пересылку требуется 5 квантов $x_0 = 20$ ед., поэтому $28.958 \times 5 = 144.79$.

Сравнивая обратное квантование с прямым, на основе выполненного исследования получаем: $160 - 145 = 15$. Это значит, что в данном случае обратное квантование выгоднее прямого квантования на 15 единиц.

2. Сравнение затрат прямого и обратного квантования в случае, когда элементы квантов могут подвергаться внешнему воздействию и получать искажения, приводящие к их ошибкам

Примем вероятность ошибки элемента кванта $q = 0.2$, среднее время устранения ошибки в кванте $\tau = 2$ часа. Закон распределения ошибок биномиальный. Среднее время исправления всех ошибок в кванте определяется выражением:

$$T = \tau \cdot \sum_{k=0}^{x_0} \frac{k \cdot x_0! \cdot q^k \cdot (1-q)^{x_0-k}}{k! \cdot (x_0-k)!}. \quad (4)$$

Определим среднее время исправления ошибочных элементов по формуле (4), т. к. для прямого квантования и 100 элементов оно составит $40 h$, а для обратного квантования и 20 элементов — $8 h$. Это определенное время нужно прибавить к соответствующему времени пробелов при прямом и обратном квантовании.

Так, для прямого квантования получаем:

$$a = 0, b = 100, f(x) = \text{dunif}(x, a, b), c1 = 60,$$

$$M1(x) = (x + c1 + 40) \cdot \int_0^{100} (\text{trunc}(\frac{z}{x}) + 1) \cdot f(z) dz, \quad (5)$$

для обратного квантования:

$$y = 0, 1..100, n = 9, \delta = 3, g(y) = \text{dnorm}(y, n, \delta), x_0 = 20,$$

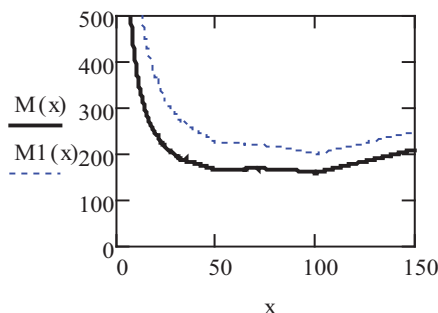


Рис. 6. Функции прямого квантования

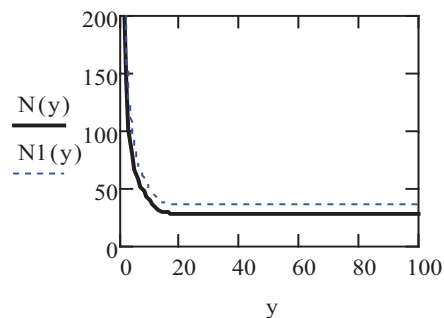


Рис. 7. Функции обратного квантования

$$N1(y) = (x_0 + d + 8) \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{y}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz. \quad (6)$$

На рисунке 6 для сравнения представлены функции прямого квантования без ошибок и с ошибками. Без ошибок: $x_0 = 100, M(100) = 160$, с ошибками: $x_0 = 100, M1(100) = 200$. Циклы по 1.

Без ошибок:

$$100 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 100$$

$$60 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 60$$

$$\int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 1$$

Итого: $100+60=160$.

С ошибками:

$$100 \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 100$$

$$(60 + 40) \cdot \int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 100$$

$$\int_0^{100} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{100}\right) + 1 \right) \cdot f(z) dz = 1$$

Итого: $100+100=200$.

На рисунке 7 для сравнения представлены функции, обратные квантованию без ошибок и с ошибками $d1 = 17$. Без ошибок на одну посылку в 20 элементов $x_0 = 20, N1(20) = 28.958$. На пять посылок $28.958 \times 5 = 144.79$. С ошибками на одну посылку $N1(20) = 36.946$. На пять посылок $36.946 \times 5 = 184.73$.

Без ошибок:

$$20 \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 19.971$$

$$9 \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 8.987$$

$$\int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{20}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 0.999$$

Итого: $19.971+8.987=28.958$.

На 5 посылок 145, т.е.

меньше, чем 160 при прямом квантовании на 15 ед.

С ошибками:

$$20 \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{36.946}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 19.971$$

$$17 \cdot \int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{36.946}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 16.975$$

$$\int_0^{20} \left(\text{trunc}\left(\frac{z}{36.946}\right) + 1 \right) \cdot g(z) dz = 0.999$$

Итого: $19.971+16.975=36.946$.

На 5 посылок 184.73, т.е.

меньше, чем 200 при прямом квантовании на 15.054 ед.

Общий вывод: коррекция ошибок при обратном квантовании выгоднее, чем при прямом.

Заключение

При порче продуктов, искажении ошибками информации необходимо восстановить их в уже введенных ограничительных рамках. К сожалению, и в условиях пандемии необходимо решать задачи, связанные с сохранением безопасности, работоспособности, здоровья, качества перемещения, лечения и профилактики групп людей, личного состава, методами дискретной математики с привлечением вероятностных и нечетких методов. Это объясняется тем, что многие предметы, явления и информация в действительности представлены фиксированными количествами [6–8]. Поэтому наряду с известной моделью квантования информации, которое мы называем прямым, в статье представлена новая модель, именуемая обратной моделью квантования.

Выводы, полученные здесь, нуждаются в дальнейшей проверке при других распределениях вероятностей. В прикладных исследованиях необходимо учитывать стоимостные, временные и другие затраты, которые будут усиливать эффективность обратного квантования. Это тема будущих прикладных исследований. Она связана с вопросами пересылки объектов, продуктов, безопасности людей, противостояния конфликтующих сторон, противодействия вредным факторам, в частности пандемии. В научном плане объемное квантование целесообразно связывать, на наш взгляд, с функциями концентрации вероятностных и нечетких процессов [9], а также с эффектами при наличии рисков.

Библиографический список

1. Гришанин Б. А. Учет ценности информации в теории ценности информации/Б. А. Гришанов//Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1967. – № 2.
2. Андронов А. М. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации/А. М. Андронов, Т. Н. Бокоев//Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 3. – С. 154–158.
3. Смагин В. А. Математическая модель детерминированных и случайных процессов в виде последовательного гиперфрактального распределения/В. А. Смагин, В. П. Бубнов//Автоматика на транспорте. – 2019. – № 2. – С. 145–159.
4. Smagin V.A. Optimum likelihood quantization of the information in space with restriction of zones of influence of quanta/V.A. Smagin//B. V. Gnedenko, RT&A #01 (31). – March 2014. – Vol.9. – Pp. 92–97.
5. Кирьянов Д. В. MathCAD 12. – СПб: БХВ-Петербург, 2005, 557 с.
6. Брюханов Ю. А. Эффекты квантования сигналов с амплитудной манипуляцией/Ю. А. Брюханов, Ю. А. Лукашевич//Радиотехника. 2020. – Т. 84. – № 1 (1). – С. 42–48.
7. Сай С. В. Способ управления качеством передачи мелких структур изображений в стандарте JPEG2000/С. В. Сай, А. Г. Шоберг//Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – № 3. – С. 401–408.

8. Gorobey N. N. Symmetry transformation parameters as classical dynamic variables in the gauge theory/N. N. Gorobey, A. S. Lukyanenko, A. V. Goltsev//St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2020. – T. 13. – № 3. – С. 130–135.
9. Smagin V. A. Application of the concentration function in fuzzy sets theory/V. A. Smagin, E. M. Shurygin//Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2020. – № 1 (21). – С. 16–23.

Smagin Vladimir A.

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support, St. Petersburg

CONCEPT OF RETURN OPTIMUM IN SENSE OF FILLING OF QUANTIZATION OF INFORMATION

We know the optimal quantization of information in the sense of filling, which implies finding the optimal time quantum of information for a given probability distribution and the minimum value of the mathematical expectation of time for it, provided that the quanta are separated by constant specified spaces. In this paper, we propose an inverse quantization to this quantization, which we call direct. In it, the quanta are fixed, known in advance, and the values of the gaps between the quanta are random, characterized by a probability distribution. The quanta themselves can have any object type, not just information. To formalize the proposed idea, the article examines an example of reverse quantization for a “heavy” probability distribution – a uniform distribution. Partial components of quantization are considered: information, spaces, and the number of cycles. Two variants are studied in the absence of errors and in the presence of errors of quantum elements. The conclusion is made in favor of reverse quantization. It can be applied more widely in practice.

Quantum, quantization, direct and return, expenses, the information, a blank, a population mean minimum, distribution of probabilities.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1- 57-66

References

1. Grishanin B. A. (1967) [*Accounting for the value of information in the theory of the value of information*]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [*Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*], no 2.
2. Andronov A. M., Bokaev T. N. (1979) [Optimal quantization of information in the sense of filling]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [*Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*], no. 3, pp. 154–158.
3. Smagin V. A., Bubnov V. P. (2019) [Mathematical model of deterministic and random processes in the form of sequential hyper fractal distribution]. *Avtomatika na transporte* [*Automation on transport*], no. 2, pp. 145–159.
4. Smagin V. A. (2014) [Article Optimum likelihood quantization of the information in space with restriction of zones of influence of quanta]. *Forum B. V. Gnedenko, RT&A*, no. 01 (31), March, vol. 9, pp. 92–97.
5. Kiryanov D. V. (2005) [*Mathcad 12*]. Saint Petersburg, “BHV-Petersburg” Publ.
6. Bryukhanov Yu. A., Lukashovich Yu. A. (2020) [Effects of quantization of signals with amplitude manipulation]. *Radio engineering*, vol. 84, no. 1 (1), pp. 42–48.

7. Sai S. V., Shoberg A. G. (2020) [A method for managing the quality of transmission of small image structures in the JPEG2000 standard]. *Computer optics*, vol. 44, no. 3, pp. 401–408.
8. Gorobey N. N., Lukyanenko A. S., Goltsev A. V. (2020) [Symmetry transformation parameters as classical dynamic variables in the gauge theory]. *St. Petersburg State Polytechnical Universit Journal. Physics and Mathematics*, vol. 13, no. 3, pp. 130–135.
9. Smagin V. A., Shurygin E. M. (2020) [Application of the concentration function in fuzzy sets theory]. *Intelligent transport technologies*, no. 1 (21), pp. 16–23.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии профессором
В. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 13.10.2020, принята к публикации 02.11.2020*

СМАГИН Владимир Александрович — заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры метрологического обеспечения Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского
e-mail: va_smagin@mail.ru

© Смагин В. В., 2021

УДК 681.518

А. В. Горелик, д-р техн. наук
И. А. Журавлев, канд. техн. наук
А. В. Орлов, канд. техн. наук
Д. В. Сперанский, д-р. техн. наук

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

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СХЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЗАДАННЫХ ВЫХОДНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Рассматривается задача построения дискретных устройств, предназначенных для синтеза заданной выходной последовательности. Такая задача возникает при решении проблемы повышения надежности сложных дискретных систем. Облегчить решение этой проблемы возможно, например, путем применения схем встроенного контроля. В их роли могут быть использованы схемы, генерирующие на своих выходах последовательности, которые являются тестами для контроля или диагностирования особо критичных модулей сложных систем. Генерацию теста можно реализовать как комбинационными схемами, так и схемами с памятью. Предложены методы разработки таких генераторов тестов. Эти методы базируются на использовании их математических моделей в виде систем булевых функций и конечных автоматов. Показано, что задача синтеза заданного теста всегда может быть решена с использованием комбинационной схемы. Для ее упрощения предложен способ поиска несущественных переменных в ее математической модели с последующим их удалением. Для случая генератора теста в виде устройства с памятью используется модель конечного автомата, представляемого в виде таблицы соответствия между входными и выходными его словами. Такая таблица называется автоматным оператором, и он обладает специальными свойствами. Описан метод синтеза реализующего оператор автомата, который называется автоматом многократного действия. Метод проиллюстрирован на примере. Рассмотрены этапы абстрактного и структурного синтеза генераторов тестов, обсуждаются вопросы их схемной реализации.

Техническая диагностика, схемы встроенного контроля, генераторы тестов, математические модели генераторов, системы булевых функций, конечные автоматы, абстрактный и структурный синтез генераторов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-85-100

Введение

С ростом сложности проектируемых цифровых устройств (ЦУ) и ответственности возлагаемых на них функций растут и требования к их надежности. Для эффективного решения этой проблемы необходимо уже на этапе проектирования ЦУ заложить возможности проведения технического диагностирования. Это достигается различными путями — выбором элементной базы, подходящим

размещением функциональных узлов и блоков, организацией тестовой и функциональной диагностики. Как правило, обеспечение достоверности результатов, минимального времени обнаружения и локализации отказов реализуется схемами контроля. Опыт показывает, что различные методы диагностирования требуют применения разных подходов к выбору типа используемых средств и построению диагностической инфраструктуры. Для функционального диагностирования обычно применяется тестопригодное проектирование. При тестовом диагностировании создается отдельная инфраструктура, которая включает в себя средства генерации тестовых векторов и анализа выходных реакций диагностируемого модуля. Поддержка работоспособности и исправности функционирования всех программно-аппаратных средств ЦУ обеспечивается встроенными средствами тестового, функционального диагностирования и восстановления работоспособности, которые включаются в диагностическую инфраструктуру.

Обзор литературы по обеспечению надежности ЦУ лежит вне рамок нашей статьи, однако мы укажем несколько монографий [1–5], посвященных этой проблеме. Надежность и отказоустойчивость функционирования ЦС и их подсистем относится к стратегическому уровню защиты безопасности систем автоматического и автоматизированного управления. Обладающие отмеченными качествами ЦУ широко используются в различных областях. Например, проблемам проектирования таких устройств в области криптографии посвящены публикации [6–11], в области железнодорожного транспорта – [3, 12]. Такие же устройства востребованы в аэрокосмической отрасли, в медицине и т. д.

Один из подходов к синтезу ЦУ с обнаружением отказов состоит во внесении избыточности во внутреннюю структуру ЦУ, облегчающую решения задачи обнаружения неисправности. Она обычно решается специальной схемой контроля (тестером), в качестве которой можно использовать заранее заданную схему. Придание упомянутых свойств ЦУ возможно при его проектировании с применением либо методов помехоустойчивого кодирования, либо тестирования особо критичных модулей ЦУ. В последнем случае возникает задача синтеза довольно простой схемы (генератора теста), включаемой в состав ЦУ в качестве составляющей диагностической инфраструктуры, которая генерирует на ее выходах заданную тестовую последовательность для конкретного модуля ЦУ.

1. Постановка задачи и математические модели генератора теста

Содержательно сформулированная в конце предыдущего раздела задача в некотором смысле аналогична той, что исследовалась в [13] для линейной стационарной динамической системы, связанной с построением управлений (входных воздействий), обеспечивающих заданный выход. Математической моделью в ней являлась система дифференциальных уравнений, а искомая функция задавалась в пространстве R^n . Здесь в роли генератора теста будут рассматриваться дискретные устройства, описываемые системами булевых функ-

ций, либо системами рекуррентных уравнений переходов и выходов. Естественным требованием к интересующему нас генератору теста, рассматриваемого как встроенная в ЦУ схема, должна быть достаточная простота. Такой генератор может быть реализован либо в виде комбинационной схемы, либо в виде схемы с памятью. Далее в качестве математической модели комбинационной схемы будет использоваться система булевых функций [14]. Что касается схем с памятью, то в качестве математической модели для них применяется конечный детерминированный автомат [15]. Техническая реализация таких автоматов произвольного вида может быть выполнена с помощью триггеров. Если же автомат линейный, то наиболее приемлемы для него, как правило, модели линейных-последовательностных машин (ЛПМ) [16], реализуемых на элементах задержки.

Прежде чем перейти к постановке задачи, введем следующие обозначения:

$$\bar{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_v(t)), \bar{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_w(t)), \bar{s}(t) = (s_1(t), \dots, s_n(t)),$$

где $\bar{u}(t), \bar{y}(t), \bar{s}(t)$ — двоичные входной, выходной векторы и вектор состояния (в случае схемы с памятью). Число компонентов входных и выходных векторов могут быть равны.

Используя введенные обозначения, приведем формальную постановку исследуемой задачи. Задана выходная последовательность $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$, где $\bar{y}_i$ есть w — разрядный кортеж, общее количество k которых соответствует количеству различных тестовых наборов. Требуется построить устройство (генератор теста) в виде комбинационной схемы или схемы с памятью, определить входную последовательность $\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_k$, где $\bar{u}_i$ — v -разрядный кортеж, найти начальное состояние $\bar{s}(0)$ для случая схемы с памятью, обеспечивающее при подаче последовательности $\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_k$ получение на выходе синтезируемого устройства (генератора теста) заданной выше выходной последовательности $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$.

2. Синтез встроенного генератора теста в виде комбинационной схемы

ЦУ — это устройства, использующие только сигналы 0 или 1, поэтому далее рассмотрим двоичные ЦУ, описываемые моделями булевых функций. Условимся считать, что длина каждого выходного кортежа (набора) генератора теста $\bar{y}_i$ содержит w разрядов, а длина каждого входного двоичного кортежа (набора) $\bar{u}_i$ содержит v двоичных разрядов.

Начнем с выяснения вопроса, всегда ли можно сгенерировать заданный тест $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k$ с помощью комбинационной схемы.

Положим величину $v = \lceil \log_2 k \rceil$, где v есть такое наименьшее целое число, что $2^v \geq k$ (округление v до ближайшего целого в большую сторону). Построим таблицу формата F , содержащую два столбца. Первый состоит из v — разрядных двоичных наборов $0...00, 0...01, \dots, 1...11$, второй — из расположенных последовательно двоичных разрядов некоторого кортежа $\bar{y}_i$. Очевидно, что таблицу F

можно рассматривать как таблицу истинности некоторой булевой функции $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$ от v переменных. Действительно, в таблице F все входные наборы при таком выборе значения v попарно различны, а во втором столбце каждому из них соответствует некоторое значение функции $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$. Таким образом, при принятых обозначениях имеет место следующее утверждение.

Лемма. Если заданы двоичные w -разрядные последовательности $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k$, то всегда можно построить w таблиц формата F , содержащих не более k входных наборов, которые являются таблицами истинности некоторых булевых функции $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v), i = 1, 2, \dots, w$ от v переменных, где $v = \lceil \log_2 k \rceil$, что их выходы образуют кортежи $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k$.

Из леммы следует ответ на сформулированный выше вопрос — искомый генератор теста всегда может быть реализован в виде комбинационной схемы. Однако при большом числе выходов у этой схемы и большой длине заданного теста сложность ее реализации, например определяемая числом используемых элементов, также будет значительной. Таким образом, принципиальная возможность реализации генератора теста в виде комбинационной схемы еще не гарантирует, что она будет более простой, чем схема с памятью. В некоторых случаях при выборе может потребоваться анализ и сравнение по сложности обоих вариантов реализации генератора теста.

Вернемся теперь к задаче синтеза тестов генератором комбинационного типа. В этом случае необходимо предложить метод построения w булевых функций $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$, при подстановке в которые подходящих входных наборов появится выходная последовательность $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_k$. Если такие функции существуют, то будем задавать их таблицами истинности.

Рассмотрим представленную ниже таблицу 1, построенную на основе таблиц истинности булевых функций $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$. В первом слева столбце указываются порядковые номера входных наборов, а сами наборы (как их получить, будет сказано ниже) выписываются последовательно во втором столбце слева в формате $u_1(i), u_2(i), \dots, u_v(i)$, где запись $u_j(i)$ — это значение i -го двоичного разряда в j -м входном наборе u_j .

Значениями функций $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$ являются i -е двоичные разряды кортежей $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$, последовательно выписанные в виде столбцов с применением аналога только что введенных обозначений.

Таблица 1

№ п\п	$x_1 \quad x_2 \dots x_v$	$f_1(x_1, \dots, x_v)$	$f_2(x_1, \dots, x_v)$	...	$f_w(x_1, \dots, x_v)$
1	$u_1(1) u_2(1) \dots u_v(1)$	$y_1(1)$	$y_2(1)$	...	$y_w(1)$
2	$u_1(2) u_2(2) \dots u_v(2)$	$y_1(2)$	$y_2(2)$	...	$y_w(2)$
...	...	...	...	...	...
k	$u_1(k) u_2(k) \dots u_v(k)$	$y_1(k)$	$y_2(k)$	...	$y_w(k)$

Построенная описанным способом совокупность булевых функций в качестве значений при подстановке в них последовательно входных наборов второго столбца будет давать в соответствующих строках двоичные кортежи $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$, образующие тест.

Для упрощения схемной реализации системы функций $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$ необходимо найти минимальное число v существенных переменных, от которых эти функции зависят.

Проверку возможности представления булевой функции путем исключения из нее несущественных переменных можно реализовать способом, который проиллюстрируем примером. Пусть таблица 2 задает функцию от трех переменных. Исключим первый столбец для проверки переменной x_1 , после чего блоки из строк 1–4 и 5–8 таблицы 2 становятся идентичными и совпадают с таблицей 3. Это означает, что $f(x_1, x_2, x_3) = f(x_2, x_3)$, т.е. переменная x_1 несущественна. Теперь проверим переменную x_2 , удаляя в таблице 2 второй столбец вместо первого. После этого видно, что значения функции $f(x_1, x_3)$ на наборах в 1-й и 3-й строках различны, т.е. x_2 — существенная переменная. Удаляя 3-й столбец таблицы 2, приходим к выводу, что x_3 также существенная переменная. Итак, таблица истинности функции $f(x_1, x_2, x_3)$ в действительности совпадает с таблицей 3.

Таблица 2

№	$x_1 x_2 x_3$	$f(x_1, x_2, x_3)$
1	000	0
2	001	1
3	010	1
4	011	0
5	100	0
6	101	1
7	110	1
8	111	0

Таблица 3

№	$x_2 x_3$	$f(x_2, x_3)$
1	00	0
2	01	1
3	10	1
4	11	0

Заметим, что удаление из таблицы истинности функции одной несущественной переменной уменьшает число строк ее таблицы истинности в два раза.

Рассмотренный пример приводит к выводу: если в столбце значений булевой функции имеется некоторый блок расположенных подряд периодически повторяющихся значений, то это признак наличия у функции несущественной переменной. Так, в нашем примере столбец значений таблицы 3 два раза подряд повторяется в столбце значений таблицы 2.

Упомянутый признак, однако, только необходимое условие для минимизации функции, но не достаточное. Можно привести примеры таких функций, у которых после удаления нескольких несущественных переменных в разных повторяющихся блоках в оставшейся части таблицы истинности появляются одинаковые входные наборы, которым соответствуют разные значения функции. Это означает, что реализация в виде комбинационной схемы в данном случае невозможна.

Если проверка покажет, что среди функций $f_1, f_2, \dots, f_w$ имеется хотя бы одна такая функция, то реализация искомого генератора теста в целом в виде комбинационной схемы невозможна. При положительном результате проверки для каждой из функций мы располагаем соответствующей таблицей истинности, построенной описанным выше методом.

Теперь на основе полученного множества таблиц истинности можно синтезировать схему для совместной реализации системы w булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_w$ любым из известных в теории дискретных устройств методом. Далее эта схема может быть минимизирована, для чего также известен целый ряд методов [14, 17]. Булевы функции $f_i(x_1, x_2, \dots, x_v)$ в рассматриваемом случае могут оказаться не полностью определенными, что дает дополнительные возможности для минимизации. Из изложенного вытекает метод решения задачи в случае принципиальной возможности «абстрактного» синтеза комбинационного генератора теста, и потому нет необходимости описывать его более детально.

Построенная система булевых функций, реализующих комбинационный генератор теста в виде комбинационной схемы, представляет собой его функциональную модель. Завершающим шагом конструирования генератора теста будет логическое и техническое проектирование. При логическом проектировании разрабатывается логическая структура генератора в виде схемы из элементов выбранного базиса. В результате определяется ее состав и перечень элементов. Выполнение этого этапа зависит от выбранной базовой технологии производства (МОП, КМОП, биполярной), вида схемы и требований к ней. Одна из основных задач этого этапа состоит в создании структурной модели, т. е. схемной реализации алгоритма функционирования, лучшей по некоторым важным параметрам. К их числу относятся площадь кристалла, быстродействие, тестопригодность и т. п.

Решение задачи структурного синтеза не является единственным. Поэтому не существует универсального метода синтеза, пригодного для любого базиса

и при любых требованиях. В настоящее время наиболее эффективны методы синтеза, развитые для конкретных базисов, описанных в [14, 17].

3. Синтез встроенного генератора теста в виде схемы с памятью

Остановимся теперь на синтезе генератора теста с использованием модели конечного детерминированного автомата [15]. Генератор теста должен преобразовывать входные слова $\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_k$ в выходные слова $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$. В исследуемой задаче множество выходных слов (тест) задано заранее. Множество входных слов может быть также задано либо его потребуется определить. Для получения генератора нужно синтезировать такой автомат, который упомянутое преобразование реализует.

Решим задачу каноническим методом синтеза автоматов [17]. Он состоит из двух этапов. Первый осуществляет абстрактный, второй — структурный синтез автомата. После выполнения первого этапа получим абстрактный автомат, представленный в виде таблицы переходов и выходов (или в виде графа). Этот автомат в общем случае не является минимальным и потому может потребовать минимизации числа состояний.

Абстрактный синтез автомата осуществим на основе таблицы соответствия между входными и выходными словами. Такая таблица называется алфавитным оператором. Напомним [17], что такой оператор называют автоматным, если он обладает следующими свойствами:

- однозначно отображает входные слова в выходные;
- удовлетворяет условиям полноты (любой начальный отрезок допустимого слова автомата также допустим);
- сохраняет длину преобразуемого слова;
- осуществляет преобразование совпадающих начальных отрезков входных слов в совпадающие начальные отрезки выходных слов.

Известно [17], если алфавитный оператор автоматный, то всегда можно синтезировать реализующий его автомат.

Если исходный оператор не является автоматным, он может быть преобразован в таковой с использованием двух операций — выравнивания и пополнения. Выравнивание используется, если нарушено третье свойство автоматности. Эта операция состоит в приписывании пустого символа «е» (он добавляется к входному и выходному алфавитам автомата) справа к входному или слева к выходному слову. Пополнение используется, если нарушено четвертое свойство автоматности, и состоит в приписывании пустого символа «е» справа к входному слову и одновременно слева к выходному слову.

В таблице 4 приведен пример применения операции выравнивания к алфавитному оператору, преобразующему двухбуквенные слова в однобуквенные.

В таблице 5 дан пример применения операции пополнения к алфавитному оператору, преобразующему двухбуквенные слова в двухбуквенные.

Таблица 4

№	$q_0 q_1$	$r_0 r_1$
1	00	e 0
2	01	e 1
3	10	e 0
4	11	e 1

Таблица 5

№	$q_0 q_1 q_2$	$r_0 r_1 r_2$
1	00 e	e 0 1
2	01 e	e 1 0
3	10 e	e 1 1
4	11 e	e 0 1

В таблице 5 первоначально одинаковые начальные отрезки из одной буквы $q_0 = 0$ в первом и втором входном словах преобразуются в $r_1 = 0$ в первом и в $r_1 = 1$ во втором выходном слове, т. е. нарушено четвертое условие автоматности. Поэтому к этим входным словам справа и к соответствующим выходным словам слева дописывается пустой символ «e». После этого одинаковые начальные отрезки первого и второго входного слова преобразуются в одинаковые начальные отрезки выходных слов из буквы «e». То же самое необходимо проделать с третьим и четвертым словом.

Для алфавитного оператора используется еще один способ представления — в виде ориентированного графа, являющегося деревом [14]. Путь (последовательность дуг) от начальной вершины графа (корня) к конечной (листу) соответствует одному входному слову. Таким образом, число уровней дерева равно длине входного слова. Из каждой вершины графа (она изображается в виде кружка между концом одной дуги и началом следующей) исходит число дуг, равное мощности входного алфавита автомата. Каждая последняя висячая вершина любого пути (лист) называется конечной.

При помощи дерева входных последовательностей осуществляется построение графа искомого конечного автомата. В дереве входных слов вершины отмечаются символами состояний автомата s_i . Начальную вершину (корень) пометим символом s_0 , а каждую конечную (лист) одним и тем же символом s_k . Для получения графа автомата Мили каждую дугу графа нагружаем парой символов q/r , где q — символ входного алфавита, r — символ выходного, а все вершины s_k совмещаем в одну.

Искомый автомат после преобразования каждого входного слова должен быть готов к преобразованию очередного входного слова. Это означает, что он

должен находиться в состоянии s_0 . Чтобы выполнить такое условие, из совмещенного в одну вершину состояния s_k необходимо провести дуги в состояние s_0 , нагруженные парами символов входного и выходного алфавита. Такой автомат называется автоматом многократного действия. В результате получаем автомат, который будет осуществлять генерацию заданного теста. В этом автомате предварительно следует выполнить минимизацию числа состояний. Проиллюстрируем изложенное на простом примере (заимствован из [17]) построения абстрактного автомата Мили по алфавитному оператору. Рассмотрим алфавитный оператор, заданный таблицей 6, который преобразует трехразрядные двоичные входные слова (первый столбец слева) в соответствующие выходные слова (второй столбец). Легко проверить, что этот оператор является алфавитным, т. е. обладает всеми четырьмя свойствами, приведенными выше.

Таблица 6

Входное слово	Выходное слово
$q_0 \ q_1 \ q_2$	$r_0 \ r_1 \ r_2$
0 0 0	0 0 1
0 0 1	0 0 0
0 1 0	0 0 1
0 1 1	0 0 0
1 0 0	0 0 1
1 0 1	0 0 0
1 1 0	0 0 1
1 1 1	0 0 0

Дерево входных последовательностей с дугами, размеченными входными и выходными словами, соответствующее таблице 6, и обозначениями состояний автомата, приведены на рисунке 1.

После объединения всех вершин s_k в одну получим граф автомата, изображенный на рисунке 2.

На втором этапе абстрактного синтеза выполним минимизацию числа состояний полученного автомата. Из рисунка 2 видно, что автомат имеет две пары эквивалентных состояний — (s_3, s_4) и (s_5, s_6) . Напомним, что два состояния автомата называются эквивалентными, если при переходе из них по одинаковым входным символам в одно и то же состояние происходит выдача одинаковых выходных символов. После их объединения (состояния обозначим как s_{34} и s_{56}) получается граф автомата с шестью состояниями. В этом полученном графе состояния s_{34} и s_{56} тоже эквивалентны и их можно объединить в одно состояние s_{3456} . Вновь полученный граф с пятью состояниями также имеет два

эквивалентных состояния s_1 и s_2 . Объединив их и обозначив новое состояние через s_{12} , в итоге получим граф с четырьмя состояниями, представленный на рисунке 3.

Завершающий шаг построения графа автомата Мили состоит в получении автомата многократного действия. С этой целью в последнем графе совместим состояние s_0 с состоянием s_k , и после переобозначений символов состояний ($S_{12} \rightarrow S_1, S_{3456} \rightarrow S_2$) получим граф на рисунке 4.

Последнему графу соответствует таблица 7 – переходы и выходы автомата.

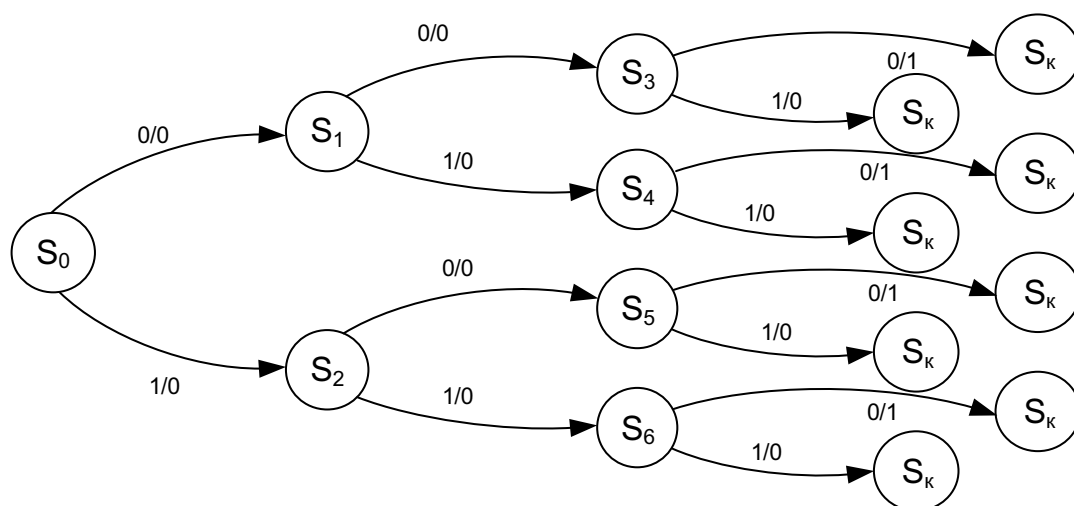


Рис. 1. Дерево входных последовательностей

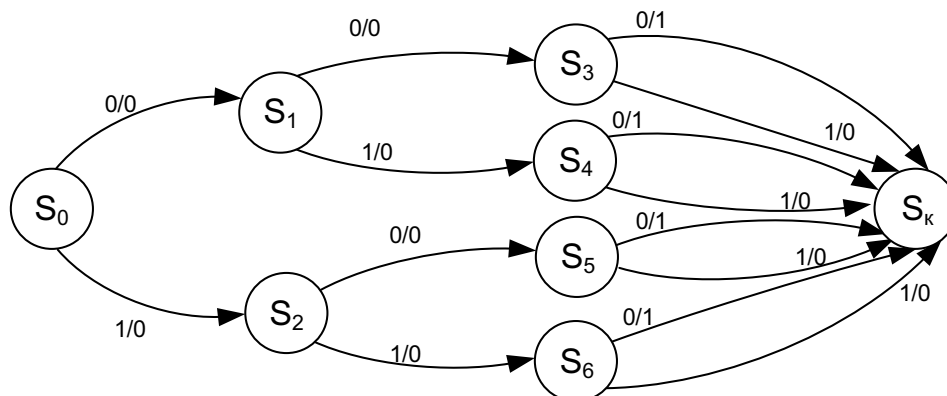


Рис. 2. Граф автомата Мили

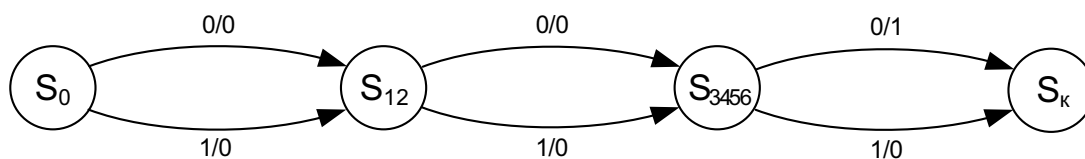


Рис. 3. Граф автомата Мили после минимизации

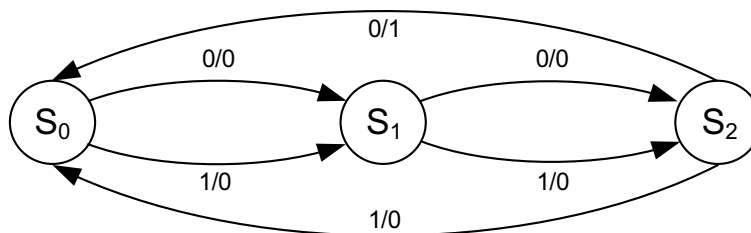


Рис. 4. Граф автомата Мили многократного действия

Таблица 7

$s \backslash q$	0	1
s_0	$s_1 / 0$	$s_1 / 0$
s_1	$s_2 / 0$	$s_2 / 0$
s_2	$s_0 / 1$	$s_0 / 0$

Таблица 8

t	$t_0 \ t_1 \ t_2$
s	$s_0 \ s_1 \ s_2$
q	1 1 0
r	0 0 1

Для подтверждения правильности требуемой в задаче генерации выходных слов полученным автоматом рассмотрим, например, результат его работы при преобразовании входного слова 1 1 0 в выходное слово. Этот результат (выходное слово 0 0 1), представленный в таблице 8, подтверждает корректность функционирования автомата.

В рассмотренном примере минимизация автомата реализована с использованием его графа.

Для автоматов с большим числом состояний этот метод очень трудоемок. Очевидно, что в этом случае предпочтительнее применять известные формализованные методы минимизации числа состояний, описанные, например, в [14, 18].

После завершения абстрактного синтеза автомата выполняется очередной этап проектирования — его структурный синтез. Он имеет много общего со структурным синтезом комбинационных устройств.

Исходными данными для него, кроме таблицы переходов-выходов конечного автомата, будут состав и перечень выбранных логических элементов, типы элементов памяти и т. п. На этом этапе формулируются требования к схеме авто-

мата по сложности, быстродействию и пр. Результатом станет функциональная схема автомата из заданных логических элементов. Как и в случае с комбинационными устройствами, решение задачи структурного синтеза для конечных автоматов не является единственным.

Соответствующие методы структурного проектирования устройств с памятью в настоящее время довольно хорошо разработаны, поэтому мы на них не останавливаемся. Отметим только, что с некоторыми из этих методов можно познакомиться в работах [4, 5, 14, 17].

Заключение

В статье рассмотрена задача синтеза заданных выходных последовательностей цифровых схем, возникающая при решении проблемы повышения надежности особо ответственных сложных технических систем. К последним, несомненно, относятся системы железнодорожной автоматики, контролирующие выполнение условий безопасности движения поездов — ответственного технологического процесса [3, 12].

Упрощению решения проблемы может способствовать использование встроенных схем контроля в составе подобных систем. В качестве таких схем могут применяться генераторы тестов для контроля или диагностирования особо критичных модулей сложных систем.

Эти генераторы могут быть реализованы в виде комбинационных схем или схем с памятью.

В статье доказано, что генераторы всегда могут быть реализованы в виде комбинационных схем. Изложен способ их синтеза, базирующийся на широко известных методах синтеза комбинационных устройств. В качестве математической модели генераторов теста предполагается использование совокупности булевых функций, заданных в виде таблиц истинности. Понятно, что при большом числе выходов генератора и большой длине теста получить достаточно компактную реализацию генератора непросто.

Альтернативой комбинационному генератору теста является генератор с памятью. В статье изложен способ синтеза таких устройств, базирующийся на использовании известного канонического метода синтеза автоматов. В этом случае в качестве математической модели генератора теста используется конечный автомат многократного действия. Предполагается, что он задается с помощью алфавитного автоматного оператора, на базе которого и синтезируется искомый генератор.

При синтезе встроенного генератора теста важным критерием будет достаточная простота соответствующей схемы. Поэтому в некоторых случаях при выборе вида генератора теста может потребоваться анализ и сравнение по сложности синтезируемых генераторов как в виде комбинационной схемы, так и в виде схемы с памятью.

Библиографический список

1. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
2. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 224 с.
3. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб: ФГОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
4. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – NY: John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
5. *Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T.* Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) – Information Science Reference, Her-shey. – N. Y., IGI Global. – 2011. – 578 p.
6. *Bertoni G. et al.* Error analysis and detection procedures for a hardware implementation of the advanced encryption standard//IEEE Transactions on Computers. – 2003. – Т. 52. – № 4. – Pp. 492–505.
7. *Di Natale G., Flottes M. L., Rouzeyre B.* On-Line Self-Test of AES Hardware Implementations//The 37-th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, 2007. – Pp. 37–42.
8. *Blömer J., Krummel V.* Analysis of countermeasures against access driven cache attacks on AES//International Workshop on Selected Areas in Cryptography. – Springer Berlin. Heidelberg, 2007. – Pp. 96–109.
9. *Opritoiu F., Bozesan A., Vladutiu M.* Pseudo random self-test architecture or Advanced Encryption Standard//Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME).- IEEE 19th International Symposium. – 2013. – Pp. 271–276.
10. *Mathew J. et al.* On the synthesis of attack tolerant cryptographic hardware//18th IEEE/IFIP International Conference on VLSI and System-on-Chip. – 2010. – Pp. 286–291.
11. *Дербунович Л. В., Караман Д. Г.* Методы функционального диагностирования ошибок шифрования в симметричных криптографических системах//Вестник НТУ «ХПИ». – № 57. – С. 81–86.
12. *Дербунович Л. В., Малиновский М. Л., Караман Д. Г., Мирошник М. А., Осипенко А. Н.* Метод проектирования строго безопасных автоматов локомотивной сигнализации// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 5. – С. 25–42.
13. *Зубова С. П., Раецкая Е. В.* Построение управлений, обеспечивающих заданный выход для дискретной линейной стационарной динамической системы//Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 5. – С. 3–23.
14. *Закревский А. Д., Поттосин Ю. В., Черемисинова Л. Д.* Логические основы проектирования дискретных устройств. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 592 с.
15. *Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж.* Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Издательский дом «Вильямс». – 2002. – 528 с.
16. *Гилл А.* Линейные последовательностные машины. Анализ, синтез и применение. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы. – 1974. – 288 с.
17. *Пестриков В. М., Дудкин В. С., Петров Г. А.* Дискретная математика: учеб. пособие. – СПб ГТУРП. – 2013. – 136 с.
18. *Гилл А.* Введение в теорию конечных автоматов. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы. – 1966. – 272 с.

Aleksandr V. Gorelik, D.Sc.
Ilya A. Zhuravlev, Ph.D.
Aleksandr V. Orlov, Ph.D.
Dmitriy V. Speranskiy, D.Sc.

*Department of Systems of Transport Infrastructure Control
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

SYNTHESIS OF DIGITAL CIRCUITS FOR GENERATING GENERATED OUTPUT SEQUENCES

The problem of constructing discrete devices intended for the synthesis of a given output sequence is considered. This problem arises when solving the problem of increasing the reliability of complex discrete systems. It is possible to facilitate the solution of this problem, for example, by using built-in control schemes. In their role, circuits can be used that generate sequences at their outputs, which are tests for monitoring or diagnosing especially critical modules of complex systems.

Test generation can be implemented both by combinational circuits and circuits with memory. Methods for the development of such test generators are proposed. These methods are based on the use of their mathematical models in the form of systems of Boolean functions and finite automata. It is shown that the problem of synthesizing a given test can always be solved using a combinational circuit. To simplify it, a method is proposed to search for insignificant variables in its mathematical model with their subsequent removal.

For the case of a test generator in the form of a device with memory, the finite state machine model is used, which is represented as a table of correspondence between its input and output words. Such a table is called an automaton operator, and it has special properties. A synthesis method is described for an automaton that implements the operator, which is called an automaton of repeated action. The method is illustrated with an example. The stages of abstract and structural synthesis of test generators are considered, issues of their circuit implementation are discussed.

Technical diagnostics; built-in control circuits; test generators; mathematical models of generators; systems of boolean functions; finite state machines; abstract and structural synthesis of generators

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-85-100

References

1. Soghomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989) *Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychevye sistemy* [Self-testing devices and fail-safe systems]. Moscow, Radio and Communication Publ., 208 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. (1992) *Samoproveryayemye diskretnye ustroystva* [Self-test discrete devices]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 224 p. (In Russian)
3. Efanov D. V. (2016) *Funktsionalny kontrol i monitoring ustroystv gheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Functional control and monitoring of the railway automatics and telemechanics devices]. Saint Petersburg: FGOU VO PGUPS Publ., 171 p. (In Russian)
4. Fujiwara E. (2006) *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*. New York, John Wiley & Sons Publ., 720 p.
5. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. (2011) *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source)*. Information Science Reference, Hershey. New York, IGI Global Publ., 578 p.

6. Bertoni G. et al. (2010) Error analysis and detection procedures for a hardware implementation of the advanced encryption standard. *IEEE Transactions on Computers*, vol. 52, no. 4, pp. 492–505.
7. Di Natale, G., Flottes, M. L., Rouzeyre B. (2007) On-Line Self-Test of AES Hardware Implementations. *The 37-th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks*, pp. 37–42.
8. Blömer J., Krummel V. (2007) Analysis of countermeasures against access driven cache attacks Springer on AES. *International Workshop on Selected Areas in Cryptography*. Berlin Heidelberg, Springer Publ., pp. 96–109.
9. Opritoiu F., Bozesan A., Vladutiu M. (2013) Pseudo random self-test architecture of Advanced Encryption Standard. *Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. IEEE 19th International Symposium, pp. 271–276.
10. Mathew J. et al. (2010) On the synthesis of attack tolerant cryptographic hardware. *18th IEEE/IFIP International Conference on VLSI and System-on-Chip*, pp. 286–291.
11. Derbunovich L. V., Karaman, D. G. (2015) Metody funktsionalnoy diagnostiki kriptograficheskikh oshibok v simmetrichnykh kriptograficheskikh sistemakh [Methods of the functional diagnostics of the encryption errors in the symmetric cryptographic systems]. *Vestnik NTU “KHPi” [National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute]*, no. 57, pp. 81–86. (In Russian)
12. Derbunovich L. V., Malinovsky M. L., Karaman D. G., Miroshnik M. A., Osipenko A. N. (2012) Metody proektirovaniya strogo bezopasnykh avtomatov lokomotivnoy signalizatsii [Design method of the strictly safe automata of the locomotive signaling]. *Informatcionnye i upravlyaushie sistemy na geleznodorozhnom transporte [Information and control systems on the railway transport]*, no. 5, pp. 25–42. (In Russian)
13. Zubova S. P., Raetskaya E. V. (2018) Construction of controls providing a given output for a linear stationary dynamic system. *Automation and Remote Control*, vol. 79, no. 5, pp. 775–792.
14. Zakrevskiy A. D., Pottosin Yu. V., Cheremisinova L. D. (2007) *Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnykh ustroystv [Logical fundamentals of the discrete device design]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 592 p. (In Russian)
15. Hopcroft J., Motwani R., Ullman J. (2001) *Introduction to automata theory, languages and computation*. Boston, New York, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 528 p.
16. Gill A. (1966) *Linear Sequential Circuits: Analysis, Synthesis, and Applications*. New York, McGraw-Hill Publ., 216 p.
17. Pestrikov V. M., Dudkin V. S., Petrov G. A. (2013) *Diskretnaya matematika: uchebnoe posobie [Textbook on discrete mathematics]*. Saint Petersburg, SPb GTURP [Petersburg State University of Industrial Technologies and Design] Publ., 136 p. (In Russian)
18. Gill A. (1962) *Introduction to the theory of finite-state machines*. New York, McGraw-Hill Publ., 212 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии

В. И. Хахановым

Поступила в редакцию 22.06.2020, принята к публикации 07.08.2020

ГОРЕЛИК Александр Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта, Москва
e-mail: agorelik@yandex.ru

ЖУРАВЛЕВ Илья Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта, Москва
e-mail: zhuravlev_ia@mail.ru

ОРЛОВ Александр Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта, Москва

e-mail: summerman1978@gmail.com

СПЕРАНСКИЙ Дмитрий Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта, Москва
e-mail: Speranskiy.dv@gmail.com

© Горелик А. В., Журавлев И. А., Орлов А. В., Сперанский Д. В., 2021

УДК 004.052.42+681.518.5

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург

Высшая школа транспорта

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Санкт-Петербургского политехнического университета

Петра Великого, Санкт-Петербург

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь

на железнодорожном транспорте»

Российский университет транспорта, Москва

В. В. Хорошев

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,

Российский университет транспорта, Москва

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОПРОСНИКИ
ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ
В ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ
АВТОМАТИКИ**

Рассмотрены особенности систем поддержки принятия решений применительно к области железнодорожного транспорта. Выделены наиболее уязвимые звенья технологического процесса перевозок и обсуждаются пути совершенствования верхнего уровня анализа, организации и управления движением с учетом ограничений на время принятия решения в условиях конфликтных и нештатных ситуаций. Предложено использовать методы теории вопросников при разработке и совершенствовании программных средств систем поддержки принятия решений, интегрированных в программные средства действующих и разрабатываемых систем технического диагностирования и мониторинга. Приводятся подробные примеры в сфере железнодорожной автоматики и телемеханики. Отмечена необходимость построения вопросников с динамическими параметрами весов событий, цен и весов вопросов, а также их количества.

Динамические вопросники являются математической основой алгоритмов диагностирования, описываются на программном уровне систем поддержки принятия решений и используют при автоматической оптимизации исторические и статистические параметры, а также данные, получаемые оперативно в режиме реального времени. Использование методов теории вопросников – обоснованный шаг при совершенствовании программных средств систем поддержки принятия решений. Автоматизация обработки диагностической информации позволяет перейти от систем накопления данных (которыми фактически являются современные системы мониторинга в области транспорта и, непосредственно, железнодорожной автоматики) к системам технического диагностирования и мониторинга, помогающим производить процедуры диагностирования и прогнозирования. Это, в свою очередь, становится основой для установления остаточного ресурса работы объектов диагностирования.

Система поддержки принятия решений; железнодорожный транспорт; управление движением; техническая диагностика и мониторинг устройств управления; теория вопросников; оптимизация; ограничения на время принятия решений

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136

Введение

Практически во всех областях науки и техники определяющую роль в процессах эксплуатации устройств и систем управления играет человек. Несмотря на то, что часть операций и вычислений производится в автоматическом режиме, человек должен не просто подтверждать полученный вариант действий, но и брать на себя ответственность при их реализации. Во многих отраслях функции человека поддаются автоматизации крайне сложно. Пример — диспетчеры, операторы, эксплуатационный и обслуживающий персонал систем критического применения в транспортной отрасли, в т. ч. на железных дорогах [1–3].

В связи с определяющей ролью человека в процессе реализации ответственных функций наиважнейшее значение приобретает его способность оперативно принять решение в сложной технологической ситуации, когда, например, имеется конфликт в протекающих процессах или возник какой-либо дефект. Не всегда человек принимает наилучшее решение в той или иной технологической ситуации, с учетом ограничений на время принятия решений и ликвидации нештатного или конфликтного события. На первый план выходит создание систем поддержки принятия решений (СППР), позволяющих давать подсказки или готовые варианты действий при разборе технологической ситуации [4].

Любая СППР строится по иерархической архитектуре и имеет на периферийном уровне систему устройств, включающую датчики дискретной и аналоговой информации и измерительные контроллеры. А на центральном уровне — программную «оболочку», анализирующую и выдающую информационные сообщения. Можно сказать, что СППР организуется на основе систем мониторинга. Зачастую ввиду больших объемов данных автоматическая система анализа может принять более выгодное решение быстрее, чем человек. Это касается как управления технологическим процессом, так и расследования инцидентов и поиска узлов, функционирующих в нештатном режиме. В сфере железнодорожного транспорта востребованы СППР, входящие в структуры систем организации и управления движением (система «автодиспетчеризации», или train management system [5, 6]), автоматического ведения поездов (система «автомашинист» [7, 8]), мониторинга объектов инфраструктуры и подвижного состава [9–12].

В основе программной «оболочки» лежат вполне определенные алгоритмы, описывающие технологические процессы, а также средства машинного анализа получаемых данных. СППР анализирует множество событий и данных и выбирает наилучший путь разрешения с учетом сложившейся обстановки. Сфокусируем внимание на одной частной задаче — развитии программного

обеспечения СППР для систем технического диагностирования и мониторинга объектов автоматизации на железнодорожном транспорте [4].

1. Техническое диагностирование и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики

Устройства и системы автоматизации на железнодорожном транспорте крайне разнообразны и включают в себя объекты инфраструктурного хозяйства, сложные аппаратно-программные комплексы и подвижные машины (локомотивы, вагоны, дрезины, путевые машины и т. д.) [13]. Одними из важнейших звеньев перевозочного процесса на железных дорогах являются технические средства железнодорожной автоматики и телемеханики, которые предназначены для выполнения информационно-вспомогательных функций безопасного регулирования движения поездов [14, 15].

Комплексы железнодорожной автоматики и телемеханики имеют распределенные структуры, а объекты автоматизации расположены друг от друга на значительных расстояниях, поэтому их устанавливают непосредственно возле объектов управления, а затем посредством кабельных трактов передачи данных соединяют с единым постом централизации управления (постом электрической централизации станции или транспортабельным модулем, расположенным на перегоне). На большинстве участков железных дорог также обустраиваются посты диспетчерской централизации, которая объединяет уже промежуточные посты и позволяет регулировать движение поездов в рамках целого участка железнодорожной линии (диспетчерского круга) [6].

Основные средства железнодорожной автоматики и телемеханики — устройства визуальной передачи данных машинисту (светофоры), приспособления для автоматизации перевода железнодорожных стрелок из одного крайнего положения в другое (стрелочные электроприводы), объекты позиционирования подвижных единиц на участках контроля (рельсовые цепи) [9]. Данные объекты относятся к так называемому напольному технологическому оборудованию и размещаются рядом с железнодорожным полотном (а рельсовые цепи и вовсе используют рельсы для организации контура контроля с помощью электрического тока). По статистике, на напольное технологическое оборудование приходится свыше 75–80 % отказов всех средств железнодорожной автоматики и телемеханики [16].

В процессе эксплуатации напольного технологического оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики реализуется стратегия его регламентного технического обслуживания. Это подразумевает проведение технического обслуживания по специально разработанным недельным, месячным, квартальным и годовым графикам. Резкое изменение климатических условий и человеческий фактор сказываются на эффекте от периодического технического обслуживания. Для автоматизации измерительных процедур, направленных

на определение технического состояния напольного оборудования, к объектам постовой автоматики подключают диагностические приборы, затем объединяют их в сеть, устанавливают приемлемый период диагностирования и так организуют систему технического диагностирования и мониторинга. О состоянии напольного технологического оборудования судят косвенно по состоянию постовых объектов. Эта информация не является полной и не позволяет проводить техническое диагностирование с высокой точностью диагноза и последующего прогноза. Но ее достаточно для автоматизации части функций по анализу данных и сокращения времени на локализацию возникшего дефекта и восстановительных процедур.

Система технического диагностирования и мониторинга получает данные от устройств, продолжающих выполнять свои функции, т. е. является системой рабочего диагностирования. В качестве исходных данных для постановки диагноза и последующего прогноза используются:

- входные воздействия на устройства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики $x_1, x_2, \dots, x_p$ (текущие состояния компонентов, действия оперативного персонала, дежурных по станциям, нештатные события);
- выходные данные с устройств и системы железнодорожной автоматики и телемеханики $y_1, y_2, \dots, y_w$ (последующие состояния компонентов, определяемые действиями оперативного персонала и дежурных по станциям, нештатными событиями);
- значения диагностических параметров $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$, получаемые от диагностического оборудования, подключенного к объектам диагностирования (ОД). Технические средства диагностирования (ТСД), получившие обозначенные исходные данные, решают задачи диагностирования и прогнозирования, фиксируя ряд диагностических событий $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_z$ (рис. 1).

Состояния объектов диагностирования $S = \{s_i\}, i = 1, 2, \dots, m$ классифицируются на штатные и нештатные, среди которых выделяется множество допустимых отказов и предотказных состояний. Некоторое подмножество $S^* \in S$ идентифицируется системой технического диагностирования и мониторинга автоматически, а для выявления событий из оставшегося подмножества $S \setminus S^*$ требуются процедуры по ручному диагностированию. Технический персонал выполняет последовательность проверок $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$, из них некоторые могут автоматически реализовываться в программных средствах системы диагностирования и мониторинга.

Исходными данными для построения алгоритма диагностирования являются исторические данные о конкретном объекте диагностирования, условия и режимы функционирования, информация о местоположении объекта и сложности проведения ручного технического диагностирования. Это позволяет для каждого диагностического события иметь значение условной вероятности его возникновения $p(s_i)$, а для каждой проверки — цену ее выполнения в виде показателя времени или эффективности проверки $c(\pi_i)$. Система технического

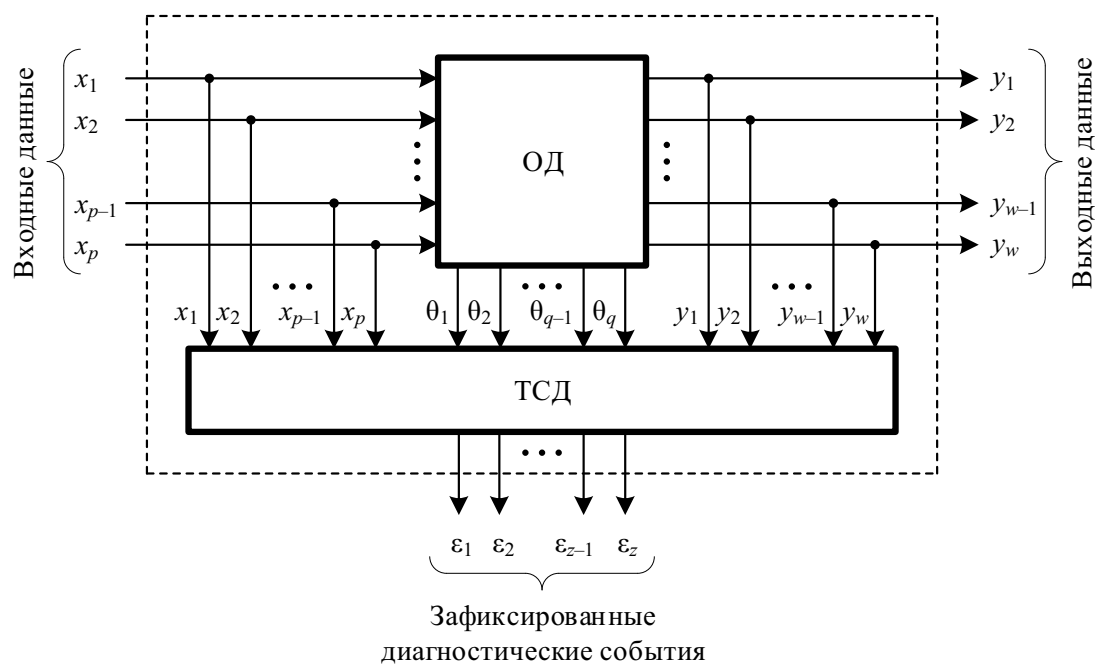


Рис. 1. Система технического диагностирования и мониторинга

диагностирования и мониторинга накапливает эту информацию в базе данных, постоянно пополняя ее и учитывая специфику функционирования объектов диагностирования. Это помогает выбрать наиболее эффективную (с минимумом затрат на реализацию) последовательность проверок, необходимую для локализации дефекта техническим персоналом — при условии, что система диагностирования не смогла автоматически идентифицировать событие.

В качестве математического инструмента удобно использовать аппарат теории вопросников [17–19]. Алгоритм диагностирования представляется в виде вопросника — ориентированного древовидного взвешенного графа. Он строится с учетом исходных данных для каждого объекта диагностирования. Такой вопросник не является «статическим» для каждого конкретного объекта диагностирования. Это именно *динамический вопросник с переменными параметрами* — множеством идентифицируемых событий (которое определяется режимами функционирования и уже зафиксированными состояниями по результатам измерений), числом необходимых для решения задачи идентификации проверок (вопросов), весами событий, ценами, основаниями и весами вопросов. Задача построения вопросника с наименьшей ценой обхода (вопросника, оптимального по критерию минимума цены обхода) в программном обеспечении системы технического диагностирования и мониторинга должна решаться оперативно. Другими словами, сам вопросник должен строиться за разумное время, с учетом операций по оптимизации, выполняемых при его построении.

Технические объекты железнодорожной автоматики и телемеханики зачастую имеют свыше 20 состояний. К примеру, для стрелочного электропривода определено только 23 вида неисправностей согласно автоматизированной си-

стеме управления хозяйством автоматики и телемеханики [20]. Это существенно усложняет процедуру построения вопросника, ведь точные методы оптимизации подразумевают выполнение операций перебора (пусть и направленного). В этом случае эффективными могут оказаться приближенные методы оптимизации вопросников [21].

Отметим еще одну особенность устройств и систем управления. Как правило, измерительные процедуры не ограничиваются постановкой бинарных вопросов, ответы на которые характеризуются вариантами «да»/«нет» («идентифицирован»/«не идентифицирован», 1/0). Многие проверки, в т. ч. связанные с ручным диагностированием (оценка измеренного параметра, визуальные проверки), могут характеризоваться большим количеством исходов [20, 22]. Поскольку время локализации дефекта и проведения восстановительных работ — ключевой фактор в работе эксплуатационного персонала, при построении вопросника нужно учитывать, что использование небинарных вопросов сокращает их число в вопроснике по сравнению с использованием только бинарных вопросов. Значит, можно сократить среднее время идентификации событий по такому вопроснику.

2. Вопросники и их особенности

Основным элементом теории вопросников является вопросник, представляющий собой совокупность множества идентифицируемых событий $S = \{s_i\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ и множества $\Pi = \{\pi_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$, необходимых для его разделения на одноэлементные подмножества вопросов. Если совокупность вопросов такова, что разделить исходное множество событий на одноэлементные подмножества невозможно ни при каких условиях, тогда решается задача неполной идентификации. Как правило, на этапе постановки задачи оговаривается полнота исходных данных и осуществляется поиск разбиения при полной или неполной идентификации.

Вопросник задается различными способами. Естественный способ задания — строчная запись с перечислением вопросов, подмножеств их исходов и указанием значений цен вопросов и весов событий. Другим способом задания будет матричная форма (анкета), фактически соответствующая строчной записи [21]. Наиболее наглядная форма задания вопросника имеет вид ориентированного древовидного взвешенного графа [19].

Как отмечено выше, в вопроснике выделяются вопросы и идентифицируемые события. Каждому событию приписан весовой коэффициент $\omega(s_i)$, $s_i \in S$ в виде некоторого абсолютного значения либо весовой коэффициент

$p(s_i) = \frac{\omega(s_i)}{\sum_{i=1}^m \omega(s_i)}$, $s_i \in S$ в виде некоторого нормированного числа — условной вероятности возникновения события. При этом $\sum_{i=1}^m p(s_i) = 1$. Каждому вопросу

соответствуют два числа: вес и цена. Под весом вопроса понимается число, равное сумме весовых коэффициентов его исходов. Под ценой вопроса понимается число $c(\pi_j)$, $\pi_j \in \Pi$, характеризующее затраты на его постановку. Цена интерпретируется различными способами: ей могут соответствовать затраты времени на выполнение процедуры, показатель эффективности постановки вопроса и т. д. В области технической диагностики цена вопроса может быть в итоге сведена к показателю времени на реализацию проверки.

Для вопросника могут определяться показатели его реализации. Одним из наиболее важных является цена обхода, характеризующая среднее время идентификации событий по вопроснику: $C = \sum_{j=1}^n p(\pi_j)c(\pi_j)$.

Цены обхода различных вопросников, как правило, различны. На цену влияет то, сколько задается вопросов и для идентификации каких именно событий. Поэтому возникает задача получить такую последовательность вопросов, которая даст в итоге наименьшую (или близкую к таковой) цену обхода вопросника. Вопросник, цена обхода которого для заданных множеств $S=\{s_i\}$, $i=1, 2, \dots, m$ и $\Pi=\{\pi_j\}$, $j=1, 2, \dots, n$ минимальна, называется *оптимальным вопросником*. Вопросник, цена которого не оптимальна, но близка к таковой, называется *квазиоптимальным вопросником*. Процесс построения оптимального вопросника называется *оптимизацией*, критерий оптимальности — минимум цены обхода. В ряде задач ограничиваются получением не оптимального вопросника, а именно близкого к таковому, поскольку существуют, например, ограничения на время оптимизации (особенно в задачах, решаемых в реальном масштабе времени).

Существуют точные методы оптимизации — ветвей и границ или динамического программирования [19], а также приближенные, такие как методы «жадной эвристики» [21]. Зачастую применение точных методов носит ограниченный характер, т. к. они основаны на направленном переборе, что, в свою очередь, при большом числе идентифицируемых событий и имеющихся вопросов приводит к весьма продолжительному времени оптимизации. Выбор того или иного метода и упрощение самой процедуры оптимизации возможны при идентификации типа вопросника, определяемого классификацией вопросников.

Основная классификация вопросников связана с учетом особенностей вопросов. Так, каждый вопрос характеризуется помимо чисел $p(\pi_j)$ и $c(\pi_j)$ еще и числом $a(\pi_j) \geq 2$ — основанием вопроса (числом его исходов). Если вопросы имеют одинаковые основания, то рассматривается *гомогенный (однородный) вопросник*. Если хотя бы один вопрос имеет основание, отличное от оснований других вопросов, то рассматривается *гетерогенный (неоднородный) вопросник*. При этом если все вопросы в вопроснике имеют основание $a(\pi_j) = 2$, то речь идет о *бинарном (дихотомичном) вопроснике* (все вопросы являются бинарными и характеризуются ответами «да» и «нет», т. е. имеют единичный и нулевой исходы).

Такие вопросники чаще всего используются на практике [21]. Вопросники, для которых $a(\pi_j) > 2$, называются *полихотомичными*. Среди них выделяются те, для которых $a(\pi_j) = 3$ — *тернарные вопросники*. Как показано в [23], тернарным вопросникам (как и вообще любым полихотомичным) присуще свойство изменения основания при постановке их на подмножествах идентифицируемых событий. Изменение основания приводит к изменению типа вопросника — он становится гетерогенным.

Помимо классификации по типу оснований вопросов, выделяются вопросники, характеризующиеся ценами вопросов и весовыми коэффициентами идентифицируемых событий. Выделяются особые классы вопросников: с равноценными и неравноценными вопросами, а также с равновесными и неравновесными событиями.

По своей конструкции вопросники также могут быть статическими и динамическими. *Статический вопросник* строится для определенных объектов, параметры вопросов и событий не меняются во времени. *Динамический вопросник* отличается возможностью изменения как числа вопросов и событий, так и их параметров, в т. ч. может допускать пересечения подмножеств исходов (иметь неопределенности и ошибки при постановке [24]), что приводит к усложнению процедур оптимизации. Статические вопросники строятся для систем и устройств управления с фиксированной структурой без возможности ее реконфигурации. Динамические характеризуют системы и устройства с переменной структурой и с переменной нагрузкой, а это на практике встречается гораздо чаще. Статические вопросники рассматриваются, например, при разработке систем обучения [22], а динамические — при разработке диагностического обеспечения устройств и систем критического применения. Реальные примеры из области железнодорожной автоматики и телемеханики будут приведены далее.

3. Динамические вопросники

Рассмотрим динамические вопросники на примере использования их в программном обеспечении систем мониторинга технических объектов. Такие системы включают в себя объекты диагностирования, набор сенсоров, позволяющих получать дискретные и аналоговые диагностические параметры, сети передачи данных, а также аппаратно-программные средства хранения и обработки диагностических данных [4]. Таким образом, системы мониторинга дают возможность для каждого объекта диагностирования накапливать и анализировать диагностические данные, чтобы идентифицировать события неисправностей. При этом возможна идентификация уже возникших событий отказов (из конечного их множества), а также прогнозирование их возникновения на стадиях докритических (предотказных) состояний [25]. Для каждого объекта диагностирования возможно накопление уникального, присущего только ему множества

диагностических данных, что позволяет даже для однотипных объектов выдавать различные результаты диагноза и прогноза.

Приведем пример из области железнодорожной автоматики [15]. Среди всех объектов железнодорожной автоматики наиболее уязвимы с позиции надежности объекты напольного технологического оборудования — рельсовые цепи и стрелочные электроприводы [16]. На железнодорожных станциях рельсовые цепи и стрелочные электроприводы обычно однотипны, но каждый из них эксплуатируется в различных условиях. Различны могут быть: нагрузка на объекты, влияние подвижного состава, сроки эксплуатации и др. В современных системах мониторинга устройств железнодорожной автоматики особенности однотипных объектов никак не учитываются [4]. Указанное обстоятельство не позволяет производить достаточно эффективную процедуру мониторинга. Доля полезной информации оказывается крайне низкой. Повысить эффективность работы систем мониторинга можно за счет использования динамических вопросников, адаптируемых в программные средства систем мониторинга.

На рисунке 2 приведена классификация вопросников с учетом их особенностей. На первом уровне классификации вопросники разделены на статические Q_s и динамические Q_D . Как уже отмечалось, статические вопросники строятся единожды и никогда не изменяются, а динамические обладают возможностью изменения параметров во времени. Статические вопросники строятся на основании исходных данных, включающих в себя диагностические модели объектов, а также статистические данные, получаемые из опыта эксплуатации типовых объектов диагностирования (в области железнодорожной автоматики данные получают, например, из автоматизированных систем учета отказов [20]). Динамические вопросники могут быть построены для однотипных объектов с общими статистическими данными о процессе функционирования (вопросники Q_D^T) и для каждого из устройств в отдельности — это индивидуальные динамические вопросники (вопросники Q_D^I). Последние разделяются на два класса в зависимости от того, какие исходные диагностические параметры используются в си-

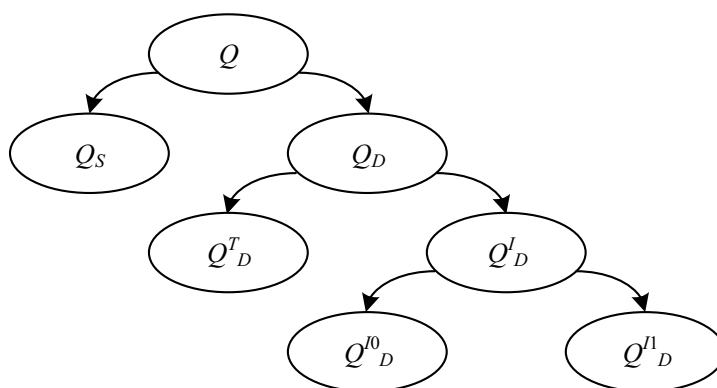


Рис. 2. Классификация вопросников

стемах мониторинга. Это могут быть динамические вопросники для устройств с уже заведенными в систему диагностическими параметрами (вопросники Q_D^{10} типа) или же вопросники, для которых множество диагностических параметров расширяется (вопросники Q_D^{11} типа). Расширение множества диагностических параметров в ряде случаев требуется для большей полноты и глубины диагностирования и последующего прогнозирования.

Рассмотрим принципы построения динамических вопросников для основных объектов напольной автоматизации систем управления на железнодорожном транспорте.

4. Диагностические модели типовых устройств железнодорожной автоматики

Основными объектами управления движением на станциях и перегонах являются распределенные датчики состояния участков пути (рельсовые цепи), устройства автоматического перевода стрелок в крайние положения (стрелочные электроприводы) и устройства передачи команд на движение машинисту (светофоры). Именно данные объекты указываются на схематических планах станций и перегонов при проектировании на них системы сигнализации (рис. 3) [15]. Данные объекты относят к напольному технологическому оборудованию железнодорожной автоматики, так как они расположены в непосредственной близости к железнодорожному полотну («в поле»). Именно данные объекты являются наиболее уязвимыми с позиции надежности. Их работа существенно зависит от внешних условий.

Напольное технологическое оборудование подключается к системе управления движением, устанавливаемой на посту централизации, посредством кабельной сети, развернутой в кабельных траншеях в определенных местах станции. В системе управления реализуются взаимозависимости между стрелками и светофорами, позволяющие организовывать безопасные перемещения поездов и маневровых составов [15].

Сконцентрируем внимание только на основных напольных технологических объектах железнодорожной автоматики. При этом в качестве примера рассмотрим рельсовые цепи тональной частоты [12], стрелочные электроприводы наиболее распространенной марки в России СП-6 (СП-6М) [20] и линзовый входной светофор [15]. На рис. 4 – рис. 6 приводятся диагностические модели данных устройств.

На рисунке 4 в виде блоков показаны: x_1 – путевой генератор (ПГ); x_2 – путевой фильтр; x_3 – путевой трансформатор питающего конца; x_4 – путевая перемычка питающего конца; x_5 – рельсовая линия; x_6 – путевая перемычка приемного конца; x_7 – путевой трансформатор приемного конца; x_8 – путевой приемник (ПП); x_9 – путевое реле. Часть оборудования расположена на посту

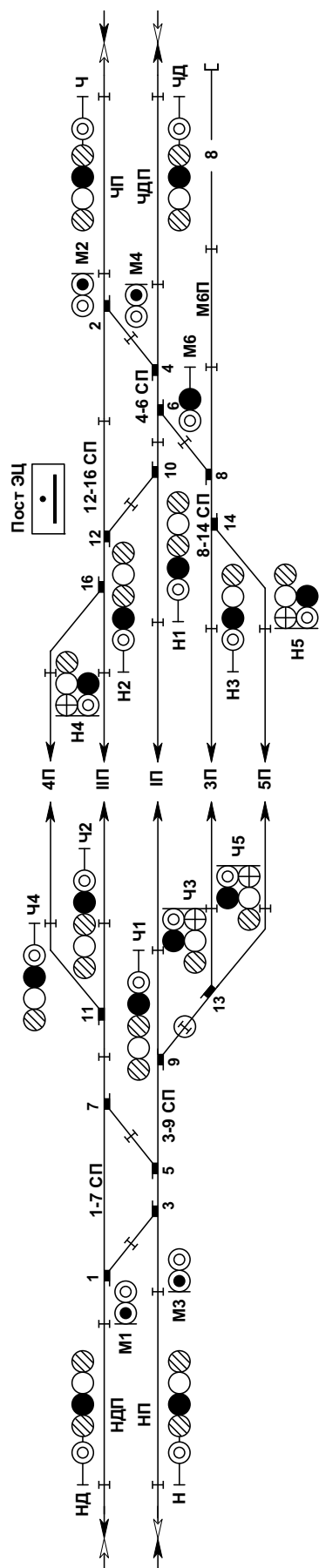


Рис. 3. Схематический план произвольной промежуточной станции

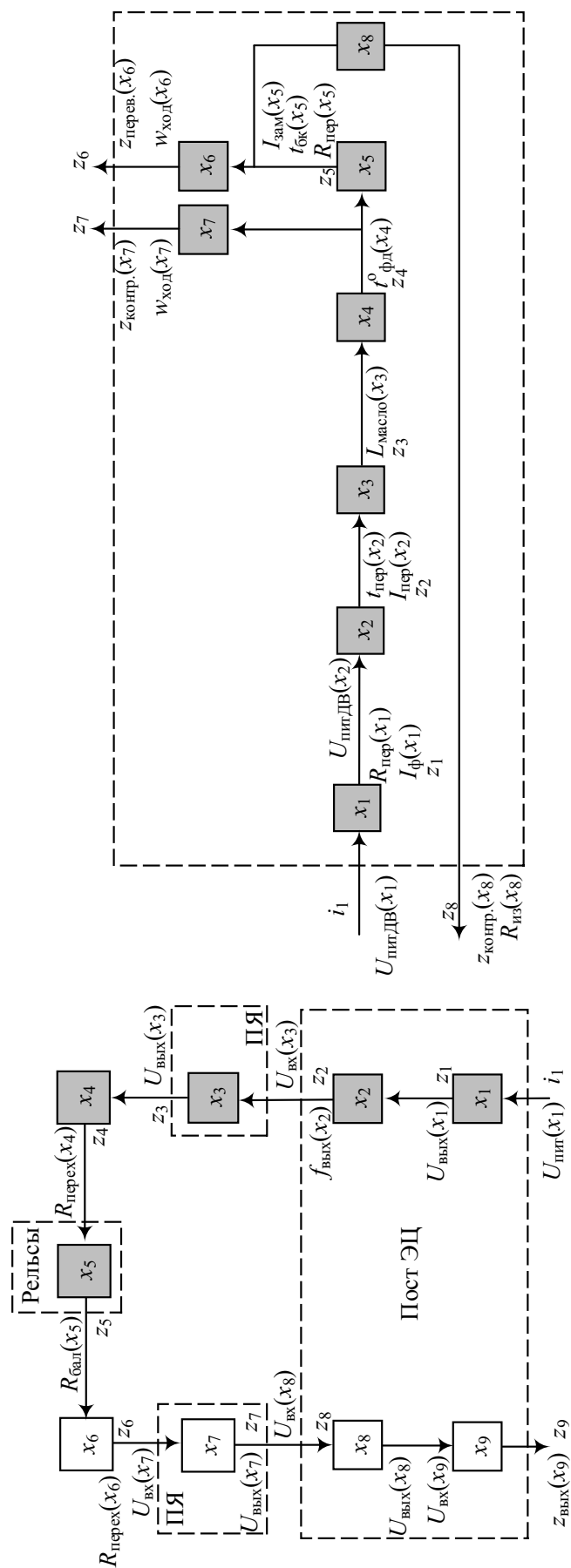


Рис. 4. Диагностическая модель релейсовой цепи тональной частоты

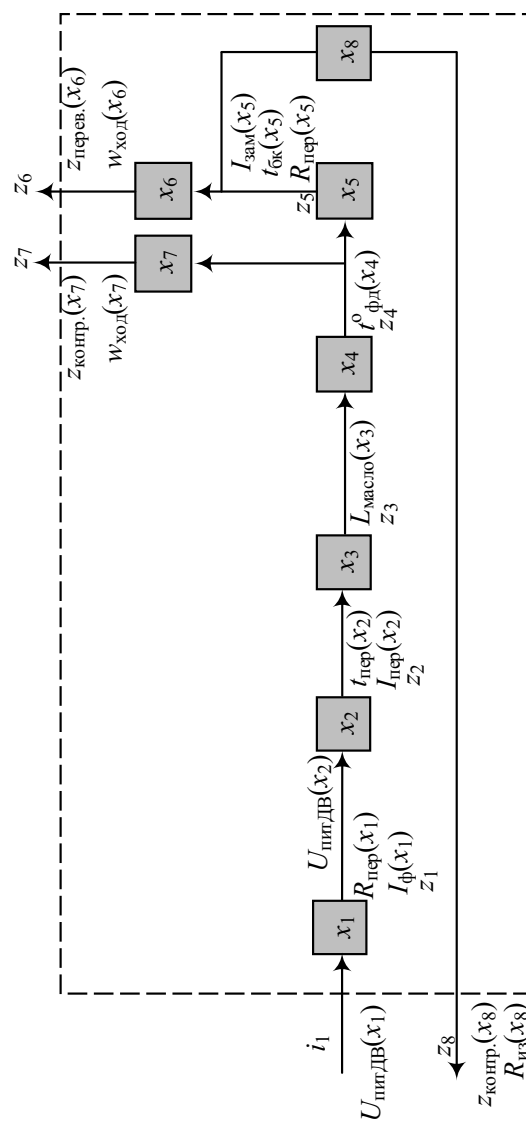


Рис. 5. Диагностическая модель стрелочного электропривода

электрической централизации (ЭЦ), часть — находится в непосредственной близости к железнодорожному полотну и размещено в путевых коробках или ящиках (ПЯ), а также частично совмещено с рельсовой линией (сигнальный ток протекает по рельсам).

Стрелочный электропривод содержит следующие компоненты (см. рис. 5): x_1 — блок-контакт; x_2 — электродвигатель; x_3 — редуктор; x_4 — фрикционное устройство; x_5 — автопереключатель; x_6 — контрольные линейки; x_7 — шиббер; x_8 — монтаж. Все оборудование стрелочного электропривода размещено в чугунном корпусе, закрепляемом при помощи стрелочной гарнитуры к рельсам.

Светофор (см. рис. 6) включает в себя следующие объекты: $x_1, x_5, x_9, x_{13}, x_{17}$ — сигнальные трансформаторы (на схеме — на каждое сигнальное показание по одному, для двухнитевых ламп — по два); $x_2, x_6, x_{10}, x_{14}, x_{18}$ — монтаж; $x_3, x_7, x_{11}, x_{15}, x_{19}$ — ламподержатель; $x_4, x_8, x_{12}, x_{16}, x_{20}$ — лампы светофора (соответственно лампы желтого верхнего огня, зеленого, красного, желтого нижнего огня и белого огня).

На рисунках 3–6 отмечены цветами (серый фон объектов) различные цепи протекания тока при различных режимах функционирования. Наличие таких режимов работы позволяет синтезировать динамические вопросники для данных устройств, функционирующие в дальнейшем в программном обеспечении систем мониторинга.

Для рельсовых цепей тональной частоты в современных системах мониторинга предусмотрены измерения напряжения питания приемника и путевого реле, выходного напряжения генератора, а также сопротивления изоляции жил кабеля. Для стрелочного электропривода реализованы измерения фазных токов и межфазных напряжений, напряжений питания контрольной цепи, времени перевода стрелки в крайние положения, сопротивления изоляции жил кабеля. Для светофора измеряются напряжение в рабочей цепи и сопротивление изоляции жил кабеля. Все эти параметры в современных системах мониторинга измеряются не на самих объектах, распределенных по станции, а на релейных стативах системы управления, расположенных на посту централизации [4].

Использование представленных выше диагностических параметров для всех однотипных объектов дает возможность построения динамических вопросников типа Q_d^T . В качестве весов событий и цен вопросов здесь будут использоваться общие статистические данные от всех типовых объектов. В настоящее время в системах мониторинга процесс фиксации отклонений от норм реализуется по достижению установленных граничных значений (нормалей). Это не является корректным, т. к. не учитывает конкретные особенности каждого из объектов диагностирования, и приводит к фиксации большого числа ложных диагностических событий. По сообщениям специалистов, доля полезной информации от систем мониторинга железнодорожной автоматики в России крайне низка и составляет около 5 % от общего объема данных. Используя те же диагностические параметры, можно синтезировать вопросники Q_d^{I0} типа. Для

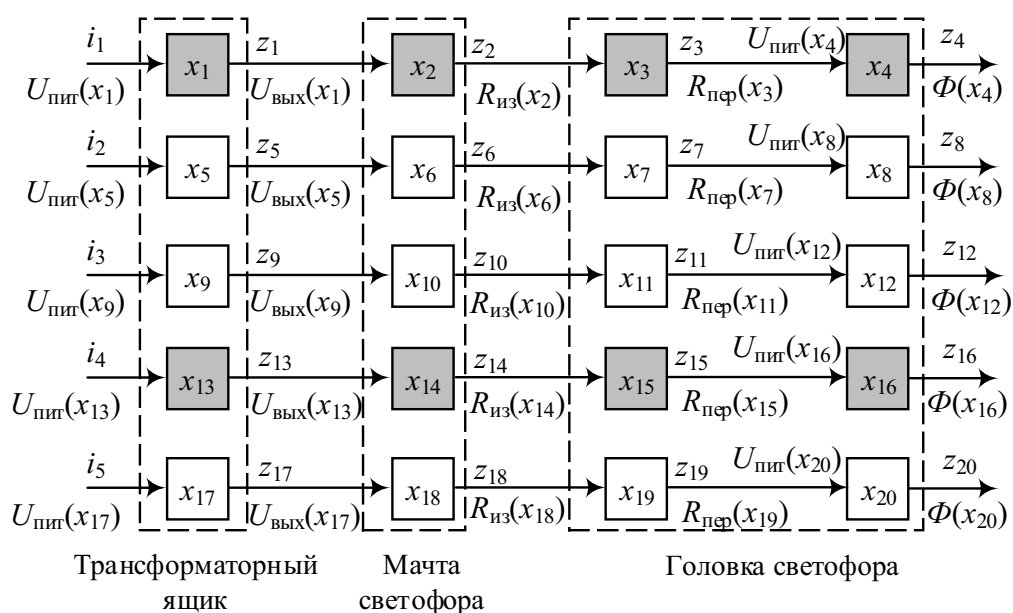


Рис. 6. Диагностическая модель входного светофора

них будут учитываться все физические свойства конкретного объекта диагностирования и все специфические условия его эксплуатации.

Чтобы достигнуть большей полноты и глубины диагностирования и достоверности последующего прогнозирования, необходимо расширить набор диагностических признаков. Для рельсовых цепей тональной частоты требуются также измерения частоты тока на входе и выходе путевого генератора, напряжений и токов на входах путевых приемников и путевых генераторов, сопротивления балласта железнодорожной призмы. Для стрелочных электроприводов необходимо измерение температуры и влажности внутри корпуса привода, уровня и температуры масла во фрикционной муфте, вибрационных воздействий на шиббер, механических параметров автопереключателя (ход ножей), а также дополнительно геометрических параметров подвижных частей стрелочного перевода (прежде всего это зазор между острием и рамным рельсом). Для светофора необходимо измерить напряжение и ток в каждой из цепей включения каждой лампы линзового комплекта, углы отклонения мачты от проектных осей и уровень вибрационных воздействий на светофор. Часть этих параметров в настоящее время сложно измерять автоматически, поэтому измерения производятся обслуживающим персоналом. К приведенным диагностическим параметрам следует добавить контроль погодных условий с помощью метеостанции. С представленными диагностическими параметрами можно синтезировать вопросники Q_D^n типа.

В перспективе диагностические данные следует получать непосредственно на каждом из объектов напольной автоматизации, а не удаленно с постовых устройств. Для реализации прямых измерений потребуется установка измерительных контроллеров в непосредственной близости к распределенным по стан-

циям объектам (в путевых коробках, муфтах, шкафах и головках светофоров). Возможно совмещение функций управления и мониторинга в одном конструктивном исполнении с легкоъемными измерительными модулями. Подобные распределенные системы управления движением поездов — ближайшее будущее железнодорожного транспорта [26].

Приведем здесь примеры вопросников различных типов для основных устройств железнодорожной автоматики.

5. Динамические вопросники для рельсовых цепей

На рисунке 7 изображены все четыре типа вопросников для рельсовых цепей тональной частоты. Вопросы в них сформулированы так:

- π_1 : «На выходе ПГ наблюдается медленное падение напряжения, резкий спад или постоянный уровень значения?»;
- π_2 : «На входе ПП наблюдается пульсирующее напряжение между нижним и верхним пределами?»;
- π_3 : «Напряжение на выходе ПГ повысилось на 5–10 %?»;
- π_4 : «Напряжение на входе ПП на минимальном уровне?»;
- π_5 : «Напряжение на входе ПП ниже нормы?»;
- π_6 : «Напряжение на выходе ПП ниже нормы?».

Опишем вопросник Q_s для рельсовой цепи тональной частоты. Корневым является вопрос π_6 , который разбивает полное множество событий на два подмножества: $\{s_4, s_8 - s_{10}\}$ по единичному исходу и $\{s_1 - s_3, s_5 - s_7\}$ по нулевому исходу. Подмножество $\{s_4, s_8 - s_{10}\}$ далее разбивается вопросом π_4 на два подмножества: $\{s_{10}\}$ (идентификация события s_{10} — излом рельса) и $\{s_4, s_8, s_9\}$ (s_4 — короткие замыкания в рельсовых цепях, s_8 — рост переходных сопротивлений и обрывы в тросовых и стыковых соединителях, s_9 — рост переходных сопротивлений и обрывы в путевых коробках и дросселях). Подмножество $\{s_1 - s_3, s_5 - s_7\}$ далее разбивается вопросом π_3 на подмножества $\{s_5 - s_7\}$ и $\{s_1 - s_3\}$. Затем первое подмножество разбивается вопросом π_3 , а второе — π_2 . Это позволяет идентифицировать следующие события: s_1 — предотказное состояние путевого генератора, s_2 — предотказное состояние путевого приемника, s_3 — предотказное состояние путевого фильтра, s_5 — отказ путевого генератора, s_6 — отказ путевого фильтра, s_7 — отказ путевого фильтра.

Вопросники Q_D^T и Q_D^{I0} для рассматриваемого устройства железнодорожной автоматики отличаются только временными характеристиками реализации проверок. Кардинальное отличие имеет вопросник Q_D^{I1} типа. Он реализуется при добавлении новых измерительных точек. Вопросы здесь формулируются иначе, поскольку возможно увеличение полноты диагностирования, а число идентифицируемых событий расширяется до девяти. На полном множестве событий задается вопрос π_1 : «Каков тип отказа?», который автоматически в программном обеспечении позволяет разбить все множество событий на три подмножества

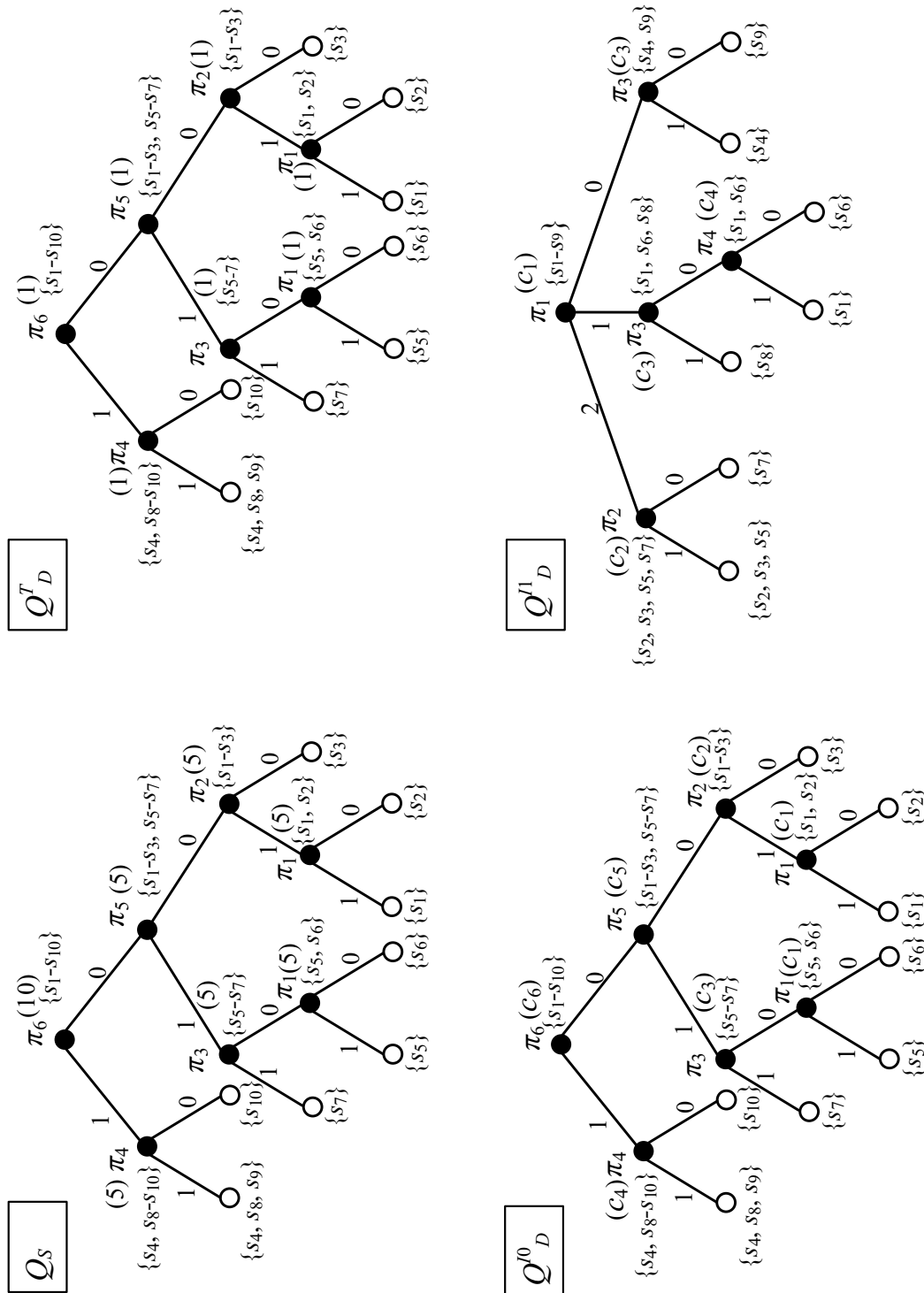


Рис. 7. Семейство вопросников для диагностирования релейной цепи тональной частоты

и в зависимости. Если ответом на вопрос π_1 будет исход «2» (отказ типа «ложная свобода»), то формируется подмножество событий $\{s_2, s_3, s_5, s_7\}$. На этом подмножестве для дальнейшей идентификации событий задается вопрос π_2 : «Напряжение на выходе путевого фильтра в норме?». Вопрос π_2 идентифицирует события: s_2 — сторонняя подпитка путевого приемника, s_3 — низкая шунтовая чувствительность, s_5 — короткое замыкание элементов путевого приемника. Данные события идентифицируются по единичному исходу. По нулевому исходу идентифицируется событие s_7 . На подмножествах событий, принадлежащих единичному и нулевому исходам корневого вопроса, формулируется один и тот же вопрос π_3 : «Напряжение на выходе путевого генератора в норме?». Он позволяет разбить подмножество нулевого исхода корневого вопроса на одноэлементные подмножества, соответствующие состояниям s_4 (низкое сопротивление балласта) и s_9 (ненормативная частота тока на выходе путевого генератора, т. е. предотказное состояние путевого генератора). Вопрос π_3 , задаваемый на подмножестве единичного исхода корневого вопроса, позволяет выделить событие s_8 (обрыв связи между приемником и фильтром), а также подмножество, состоящее из событий s_1 (неисправность путевого генератора) и s_6 (отсутствие питающего полюса для путевого генератора). Последнее подмножество разделяется вопросом π_4 : «Напряжение питания генератора в норме?».

Из анализа вопросников, приведенных на рисунке 7, следует, что некоторые события в них остаются неразделенными. Это требует дополнительных проверок, производимых эксплуатационным персоналом дистанций сигнализации, централизации и блокировки. Автоматически, с помощью средств систем мониторинга, ряд событий не удастся идентифицировать. При этом, однако, сокращается время на локализацию неисправности.

Обратим внимание также на то, что вопросники Q_s и Q_d^T содержат численные данные о ценах вопросов и весах событий, т. к. строятся на основании общих статистических данных об эксплуатации технических объектов. Вопросники же типов Q_d^{I0} и Q_d^{I1} в приведенных примерах не оперируют какими-либо численными значениями, поскольку значения цен вопросов и весов событий определяются для каждого объекта индивидуально с учетом его расположения относительно поста централизации управления, физических параметров и исторических данных об эксплуатации.

6. Динамические вопросники для стрелочных электроприводов

Вопросники для стрелочного электропривода приведены на рисунке 8.

Вопросник Q_s включает в себя следующие вопросы:

- π_1 : «Каково показание амперметра?»;
- π_2 : «Обнаруживается ли неисправность стрелочного электропривода после визуального осмотра всех частей автопереключателя, контрольных линеек и шибера?»;



- π_3 : «Обнаруживается ли неисправность электропривода после механической проверки ослабления крепления контрольных линеек или шибера, а также редуктора?»;
- π_4 : «В норме ли сопротивление изоляции монтажа?»;
- π_5 : «Обнаруживается ли неисправность электропривода после визуального осмотра курбельного контакта?»;
- π_6 : «В норме ли коммутация и двигатель по отдельности?».

Из вопросов ясно, что Q_s строится на основе экспертной оценки. Корневым будет вопрос π_1 . Он разбивает исходное множество событий на три подмножества: $\{s_1 - s_7, s_9 - s_{15}, s_{23}\}$, $\{s_{13} - s_{22}\}$ и $\{s_8\}$. Нулевому исходу корневого вопроса сопоставлен ответ: «Стрелка амперметра неподвижна». Единичному исходу — ответ: «Стрелка амперметра делает бросок, далее значение тока < 2 А». Исходу «2» — ответ: «Сначала стрелка амперметра делает бросок до 5 А, а в течение перевода удерживается на отметке 2 А». По нулевому исходу корневого вопроса идентифицируется событие s_8 (произошла разрегулировка фрикционного сцепления).

События по исходу «2» корневого вопроса разделяются вопросом π_2 . Он выделяет подмножества $\{s_2 - s_6, s_9, s_{11}\}$ и $\{s_1, s_7, s_{10}, s_{12} - s_{15}, s_{23}\}$. Единичный исход вопроса π_2 включает в себя подмножество событий s_2 (излом контактных колодок автопереключателя), s_3 (излом ножевых колодок автопереключателя), s_4 (излом рычагов автопереключателя), s_5 (излом пружин автопереключателя), s_6 (излом контактной рессорной пружины автопереключателя), s_9 (излом контрольных линеек), s_{11} (попадание постороннего предмета, препятствующего движению шибера). Последующая идентификация событий на полученном подмножестве производится ручными проверками. Нулевой исход вопроса π_2 образует подмножество $\{s_1, s_7, s_{10}, s_{12} - s_{15}, s_{23}\}$, на котором задается вопрос π_3 . Он разбивает данное подмножество на подмножества $\{s_{10}, s_{12}, s_{23}\}$ и $\{s_1, s_7, s_{13} - s_{15}\}$.

По единичному исходу идентифицируются события s_{10} (ослабление крепления контрольных линеек), s_{12} (ослабление крепления шибера), s_{23} (неисправность редуктора). Подмножество нулевого исхода разбивается вопросом π_4 на подмножества $\{s_1, s_7\}$ и $\{s_{13} - s_{15}\}$. Единичный исход вопроса π_4 позволяет идентифицировать события s_1 (разрегулировка контактов автопереключателя) и s_7 (индевание контактов автопереключателя).

Вернемся к корневому вопросу. Его единичному исходу соответствует подмножество $\{s_{13} - s_{22}\}$. Оно разбивается вопросом π_5 на подмножества: $\{s_{16}\}$ и $\{s_{13} - s_{15}, s_{17} - s_{22}\}$. Единичный исход этого вопроса позволяет идентифицировать событие s_{16} (неисправность курбельного контакта). По нулевому исходу остается подмножество $\{s_{13} - s_{15}, s_{17} - s_{22}\}$. Оно разбивается вопросом π_6 . Вопрос в зависимости от ответа обнаруживает следующие события: s_{13} (обрыв монтажа), s_{14} (нарушение изоляции монтажа), s_{15} (неисправность клеммной колодки), s_{17} (обрыв обмотки статора электродвигателя), s_{18} (обрыв обмотки якоря элек-

тродвигателя), s_{19} (неисправность щеточного узла электродвигателя), s_{20} (понижение изоляции монтажа), s_{21} (неисправность коллектора электродвигателя), s_{22} (обрыв внутреннего монтажа электродвигателя).

Обратимся к динамическим вопросникам для стрелочного электропривода. На рисунке 8 для каждого типа динамических вопросников приведены по два вопросника. Первый (верхний) соответствует рабочему режиму перевода стрелки и, соответственно, активному режиму работы двигателя. Второй (нижний) соответствует контрольному режиму работы, когда двигатель электропривода отключен.

Типовой динамический вопросник Q_d^T реализован следующим образом. Верхний вопросник отличается только ценами вопросов, т. к. использование системы мониторинга позволяет сократить время на постановку вопросов. Примером изменения времени реализации проверки может служить вопрос π_3 . Например, в вопроснике Q_s цена вопроса отмечена как 25 минут, а в вопроснике Q_d^T — как 10 минут. Причина в том, что в вопроснике Q_d^T удалено время на проход к месту расположения электропривода, поскольку проверка π_3 выполняется после проверки π_2 которая производится уже на месте установки привода. В контрольном режиме имеется множество событий, соответствующих контрольному режиму работы стрелочного электропривода: $\{s_1 - s_7, s_9, s_{12} - s_{16}\}$. Для поиска неисправностей в контрольном режиме на данном множестве задается вопрос π_1 : «Отказ устройства произошел на посту централизации?». Поясним для широкого круга читателей: элементы контрольной цепи располагаются как непосредственно «на поле» (возле железнодорожного пути), так и в релейном помещении поста централизации. Рассматриваемое множество разбивается на два подмножества: $\{s_{14}\}$ и $\{s_1 - s_7, s_9, s_{12} - s_{13}, s_{15} - s_{16}\}$. По единичному исходу вопроса происходит идентификация события s_{14} (нарушение изоляции монтажа стрелочного электропривода). На подмножестве $\{s_1 - s_7, s_9, s_{12} - s_{13}, s_{15} - s_{16}\}$ задается вопрос π_2 : «Обнаруживается ли неисправность после осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек?». Вопрос разбивает подмножество событий на два многоэлементных подмножества. Подмножество единичного исхода вопроса разбивается новым вопросом π_3 («Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки ослабления крепления контрольных линеек?»), а подмножество нулевого исхода — новым вопросом π_4 («Обнаруживается отказ в устройстве при измерении сопротивления изоляции и токов в монтаже контрольной цепи?»). Вопрос π_3 идентифицирует такие события: s_1 (разрегулировка контактов автопереключателя), s_2 (излом контактных колодок автопереключателя), s_3 (излом ножевых колодок автопереключателя), s_4 (излом рычагов автопереключателя), s_5 (излом пружин автопереключателя), s_6 (излом контактной рессоры автопереключателя), s_7 (индевание контактов), s_9 (излом контрольной линейки), s_{12} (ослабление крепления шибера). Вопрос π_4 идентифицирует события s_{13} (обрыв монтажа) и s_{15} (неисправность клеммной колодки).

Вопросник Q_D^{I0} похож на вопросник Q_D^T — за тем лишь исключением, что цены вопросов и веса событий формируются для каждого конкретного устройства индивидуально.

Вопросник же Q_D^{I1} построен с учетом возможностей расширения числа контрольных точек, в которых диагностические параметры измеряются автоматически. Благодаря увеличению автоматически контролируемых параметров устройств появляются новые вопросы и меняются формулировки уже имеющих. В качестве примера приведем вопрос π_3 . В Q_D^{I0} вопрос π_3 сформулирован так: «Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки следующих устройств: ослабление крепление контрольных линеек или шибера, неисправность редуктора?». В Q_D^{I1} вопрос π_3 выглядит иначе: «Имеются ли посторонние ударно-вибрационные воздействия?». Также добавлены вопросы π_7 («Соппротивление изоляции кабеля в норме?») и π_8 («Отказы, выявленные по токовой диаграмме перевода и данным с акселерометра?»). Вопрос π_7 задается на подмножестве $\{s_{13} - s_{15}\}$. По единичному исходу данного вопроса идентифицируется событие s_{13} , а по нулевому исходу — события s_{14} и s_{15} . Вопрос π_8 задается на подмножестве $\{s_1, s_7, s_{10}, s_{12} - s_{15}, s_{23} - s_{24}, s_{26} - s_{28}\}$. По исходу «2» идентифицируется событие s_{10} . По единичному исходу идентифицируются события s_{12} и s_{27} , а по нулевому — события s_{23}, s_{26}, s_{28} . Как можно заметить, с увеличением контрольных точек расширяется подмножество диагностических событий, куда вошли события s_{24} (наличие влаги), s_{25} (низкий уровень масла в редукторе), s_{26} (неплавный ход острияков), s_{27} (увеличенный/уменьшенный зазор между острияком и рамным рельсом), s_{28} (вероятное загрязнение башмаков).

По аналогии с описанным выше для рабочего режима добавляются и вопросы для контрольного режима. Вопрос π_5 : «Имеется ли ударно-вибрационные воздействия на шибер при прохождении поезда?». Вопрос π_6 : «Влажность и температура в приводе в норме?».

7. Динамические вопросники для светофоров

Для входного светофора используются вопросники, изображенные на рисунке 9.

Вопросник Q_S подразумевает в качестве корневого использование вопроса π_1 , формулируемого так: «Есть ли напряжение питания в трансформаторном ящике?». Он разделяет исходное множество событий на три подмножества. Подмножества единичного и нулевого исходов одноэлементны. Вопрос π_1 позволяет идентифицировать события s_6 (понижение изоляции кабеля) и s_7 (отсутствие питания, приходящего из релейного шкафа). Исходу «2» корневого вопроса соответствует подмножество $\{s_1 - s_5\}$. На нем для дальнейшей идентификации событий задается вопрос π_2 : «Имеется ли на выходе с сигнального трансформатора нормативное напряжение?». По нулевому исходу данного вопроса идентифицируется событие s_1 (отказ сигнального трансформатора). Под-

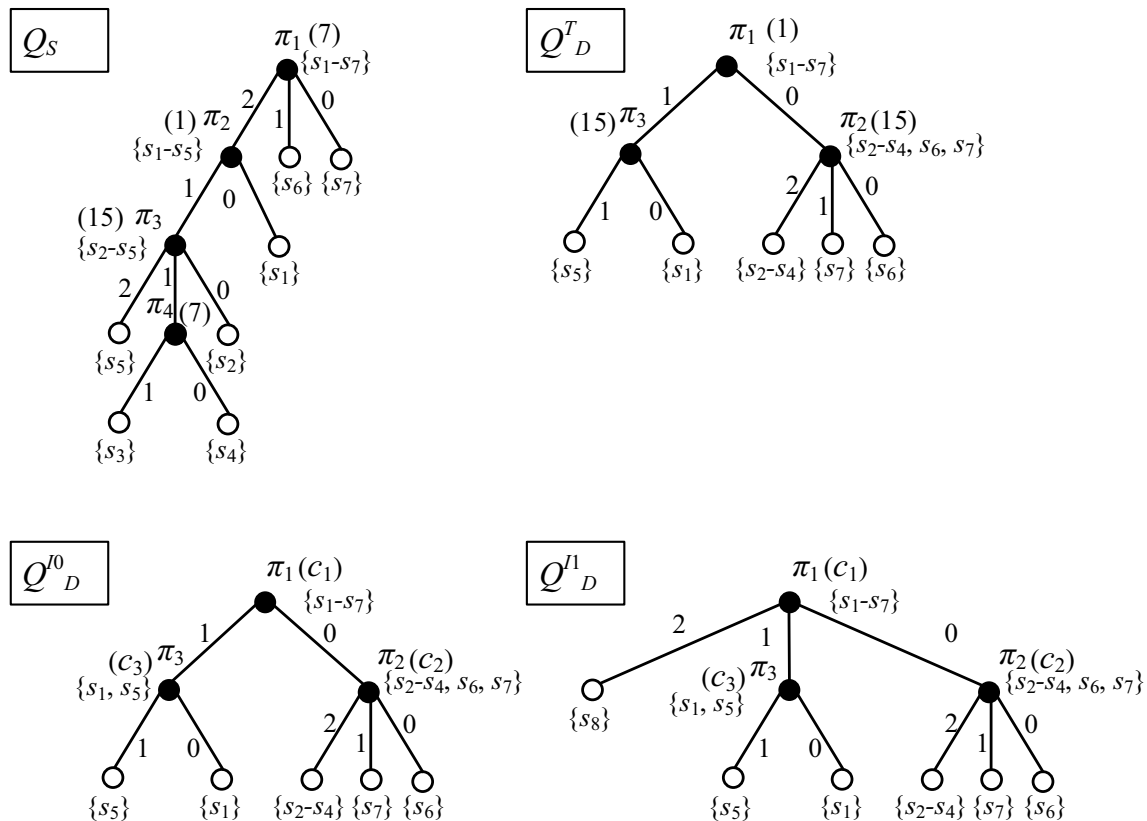


Рис. 9. Семейство вопросников для диагностирования входного светофора

множество единичного исхода вопроса π_2 является многоэлементным: $\{s_2 - s_5\}$. Для его дальнейшего разбиения используется вопрос π_3 («Каково напряжение на клеммах ламподержателя?»), а затем — π_4 («Восстановилось ли напряжение после чистки ламподержателя?»). При постановке вопроса π_3 возможна идентификация событий s_5 (неисправность лампы) и s_2 (обрыв жил коммутации). При постановке вопроса π_4 на единичном исходе предыдущего вопроса идентифицируются события s_3 (плохой контакт в ламподержателе) и s_4 (повреждение коммутации).

Вопросник Q_D^T для светофора отличается от вопросника Q_S . Исходное множество событий в нем разбивается вопросом π_1 : «Каков тип отказа?». Далее подмножество единичного исхода корневого вопроса разбивается вопросом π_3 : «Имеется ли на выходе с трансформаторного ящика нормативное напряжение?». В этом случае определяются события s_5 (неисправность лампы) и s_1 (отказ сигнального трансформатора). Подмножество нулевого исхода корневого вопроса разбивается вопросом π_2 : «Приходит ли напряжение питания на сигнальный трансформатор?». Он может иметь три варианта ответа: исход «2» — «Да, имеется», исход «1» — «Нет, отсутствует», исход «0» — «Да, имеется, но пониженное». Постановка вопроса π_2 позволяет идентифицировать события s_7 (отсутствие электропитания, приходящего из релейного шкафа) и s_6 (пони-

жение сопротивления изоляции кабеля). Также есть третий исход (исход «2») вопроса π_2 , по которому идентифицируются события s_2, s_3, s_4 (их трактовка дана выше).

Аналогичен описанному вопросник Q_D^{10} , для которого, однако, цены вопросов и веса событий определяются индивидуально по каждому объекту диагностирования.

Вопросник Q_D^{11} для светофора может содержать на одно состояние больше. Например, добавление датчика инклинометрии позволяет идентифицировать дополнительное событие s_8 (ненормативное отклонение мачты). Такое событие идентифицируется по третьему исходу корневого вопроса π_1 .

Отметим, что в диагностической модели светофора (см. рис. 6) имеется несколько отдельных цепей включения ламп. Физически эти цепи разделены, но питание поступает от единого источника. В приведенных на рисунке 9 вопросниках все однотипные неисправности для разных показаний светофора унифицированы и объединены. Другими словами, вопросник работает для тех ламп, которые находятся под нагрузкой. Все неисправности идентифицируются для рабочих объектов в соответствующем режиме.

Поиск неисправностей в монтаже может быть углублен до уровня одной жилы, т. к. в мачте светофора укладывается жгут, а в жгуте отдельные провода питают разные лампы. В реальных условиях к приведенному множеству отказов светофора можно добавить неисправность лампы красного огня, обрыв жилы питания красного огня светофора, неисправность лампы желтого огня, обрыв жилы желтого огня светофора и т. д. Впрочем, это можно учесть на программном уровне системы мониторинга и выделять неисправности логически.

8. Особенности выбора параметров вопросников

При адаптации вопросников в программные средства систем мониторинга необходимо заносить в базу данных их индивидуальные параметры. Все остальные параметры настраиваются единожды (особенности формализации первичных вопросов будут освещены в следующем разделе статьи) и затем обновляются и уточняются с учетом особенностей эксплуатации объектов диагностирования.

Возникает вопрос: как же определяются параметры вопросника — такие как число вопросов, их основания, цены и веса, а также веса событий?

Изменение весов событий и цен вопросов происходит по ряду особенностей объектов диагностирования. Такие особенности присущи целой группе устройств, отдельному устройству или его видам. Если речь идет о динамических типовых вопросниках, тогда единственной особенностью будет тип объекта диагностирования. К примеру, стрелочные электроприводы на железнодорожной станции. Зачастую в границах одной станции эксплуатируется один и тот же вид стрелочных электроприводов. Стрелочные электроприводы имеют одно и то же

множество состояний, которые в системе мониторинга могут быть определены по множеству контролируемых диагностических параметров. Для одного типа устройств это множество параметров одинаково. Аналогично по видам можно разделить все остальные объекты железнодорожной автоматики.

В случае динамических индивидуальных вопросников система мониторинга может иметь индивидуальные параметры для каждого устройства, что позволяет строить вопросник, соответствующий более достоверным данным о параметрах поиска неисправности или предотказного состояния. К особенностям устройства нужно отнести его местоположение (учет местности, на которой он расположен, влажность грунта, заснеженность, воздействие солнца), нагрузку на объект со стороны подвижных единиц, учет замены аппаратуры, наработку на отказ. Все это влияет на распределение условных вероятностей событий (отказов и предотказов) между составными элементами в объекте диагностирования. Тогда производится динамическое изменение условных вероятностей событий путем пересчета в программных средствах системы мониторинга с использованием всей приведенной выше информации об объекте диагностирования.

Еще один динамический параметр — цена вопроса. Ее динамическое изменение происходит по причине пересчета времени на проверку. Он может быть осуществлен исходя из нескольких обстоятельств, например различных цен выполнения процедур идентификации событий в разное время суток и в разные периоды года, в условиях разных режимов функционирования. Даже когда мы говорим о вопросниках, строящихся для однотипных устройств, но расположенных с разной удаленностью от поста централизации управления, цены вопросов должны быть скорректированы.

Обратим на это внимание читателя. Как правило, при поиске неисправности в объекте напольной автоматизации на железнодорожном транспорте учитывается и время следования к объекту диагностирования. Это позволяет прогнозировать время локализации неисправности. Расчет расстояния от объекта диагностирования до обслуживающего персонала может производиться путем внесения данных в систему мониторинга либо путем стыковки с действующими системами электронного документообеспечения [27]. Может учитываться точная геопозиция обслуживающего персонала, определяемая различными методами. Например, с учетом использования геопозиции личного мобильного телефона и передачи этой информации в систему мониторинга в момент возникновения неисправности или геопозиции дополнительных носимых элементов (специализированных браслетов, часов и т. п.). Изменение цены вопроса относительно поставленных проверок происходит из-за того, что некоторое подмножество проверок необходимо производить на посту централизации, а некоторое другое их подмножество — на самом объекте напольной автоматизации. При построении динамического вопросника последовательность постановки проверок влияет на время их реализации. Если требуется произве-

сти некоторое множество проверок только на устройстве, то время на дорогу до объекта учитывается только в цене вопроса первой проверки в вопроснике. Если вопросник подразумевает проверки и на посту централизации управления и на объекте диагностирования, то учет времени на дорогу до объекта или поста ведется только в первой проверке, следующей за перемещением персонала до места ее проведения. Цена вопроса меняется и в зависимости от количества персонала, занятого проверками. Нахождение одного работника на объекте диагностирования, а другого на посту централизации сократит время на передвижение.

Простейший и наглядный пример формирования цены проверки представлен на рисунке 10. Приведен фрагмент однопутной схемы-плана станции с двумя маршрутами до стрелочных электроприводов на станции (стрелок № 6 и № 7) от поста централизации управления. При реализации одной и той же проверки со временем $t_{пр1}$ на стрелочных электроприводах обоих стрелок к цене проверки будет прибавлено разное время следования к объекту диагностирования. Соответственно, стрелка № 6 будет проверена быстрее, чем стрелка № 7.

Изменение распределения вероятностей возникновения событий (весов событий) между составными частями стрелочного электропривода, как уже ранее говорилось, происходит по причине разных условий эксплуатации даже в пределах одной станции. Опишем простой пример изменения весов событий на примере двух стрелочных электроприводов стрелок № 12 и № 18. Данные стрелки выделены на рисунке 11. Предположим, что стрелочные электроприводы имеют следующие особенности эксплуатации.

Стрелочный электропривод стрелки № 12 имеет такие показатели:

- в среднем число переводов за сутки — 90;
- число поездов в сутки — 25 пассажирских, 30 грузовых, 15 пригородных, 25 маневровых;
- двигатель был установлен 23 дня назад по причине периодической замены;
- срок установки СЭП — 12 июня 2019 года;
- последние процедуры обслуживания производились четыре дня назад;
- сам привод располагается в районе болотистой местности с плохим водоотводом;
- два дня назад работники путевой части производили затяжку корней остряков и затянули болты с усилием более нормативных значений.

Стрелочному электроприводу стрелки № 18 присущи такие особенности:

- среднее число переводов за сутки — 10;
- число поездов в сутки — 12 маневровых, часто стоят составы с удобрением с завода неподалеку от соседней станции;
- двигатель был заменен 62 дня назад по причине периодической замены;
- срок установки привода — 28 апреля 2016 года;
- последние процедуры по обслуживанию производились два дня назад;

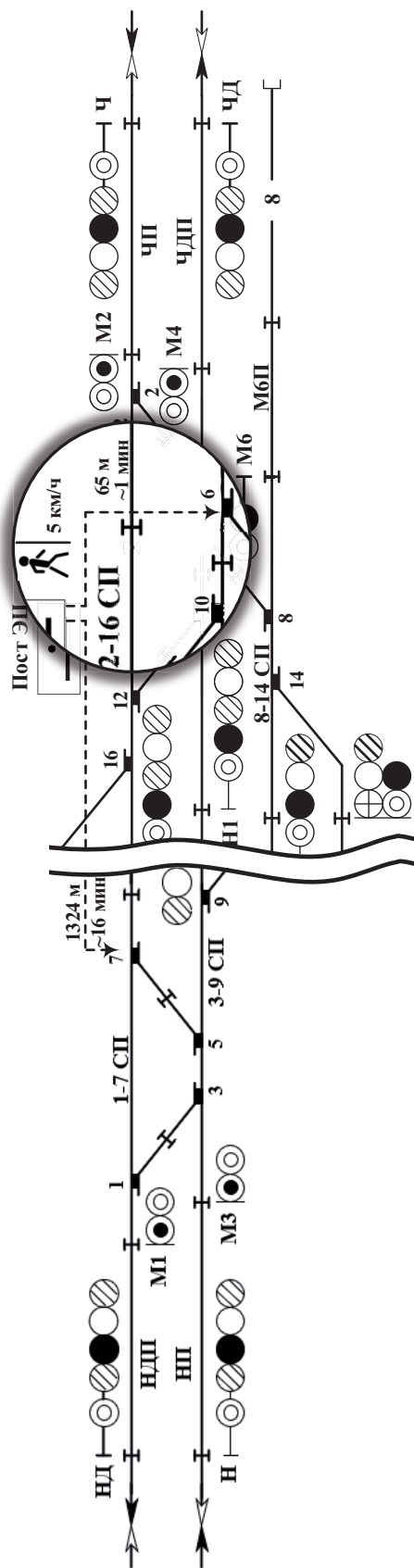


Рис. 10. Схематический план станции с указанием маршрутов перемещения обслуживающего персонала

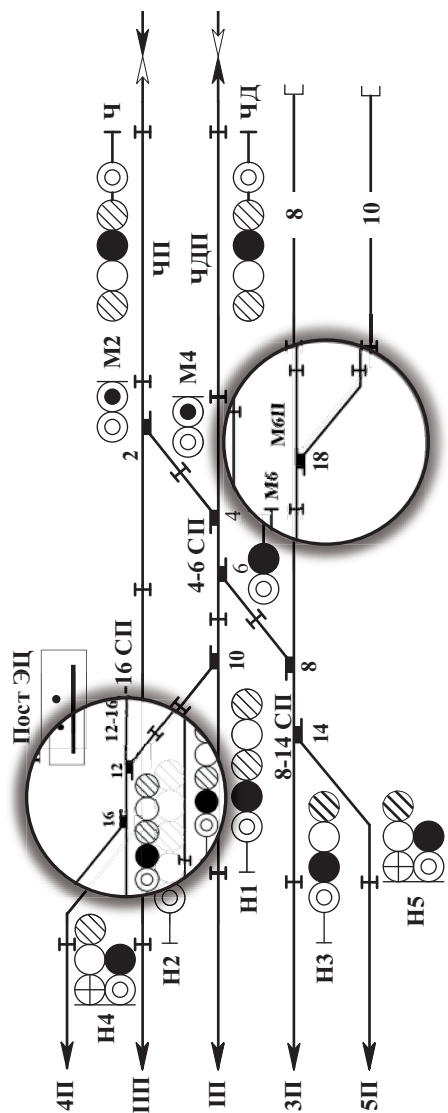


Рис. 11. Схематический план станции с указанием стрелочных переводов

- по стрелке в основном перевозят вагоны с удобрениями и производят маневры;
- стрелка переводится довольно редко.

Большую нагрузку испытывает стрелочный электропривод на стрелке № 12, т. к. находится на главном пути и через стрелку проходит основной поток поездов. Стрелка № 18 испытывает меньшее число нагрузок, поскольку ведет в тупики. Количество переводов стрелки № 18 не превышает число переводов стрелки № 12. Значит, наработка на отказ стрелки № 12 больше.

Веса событий на первом этапе определяются с учетом имеющейся статистики по всем объектам ОАО «РЖД». Например, так, как это сделано в [20], на основании систем учета отказов.

На втором этапе данные уточняются для каждого объекта диагностирования индивидуально самой системой мониторинга.

9. Алгоритм формализации исходных вопросов

Отметим следующую особенность предлагаемой технологии мониторинга на основе динамических вопросников. Первоначально требуется формализовать исходные вопросы и внести их в базу данных аналитической подсистемы системы мониторинга. Эта задача не так сложна, как кажется. Все объекты железнодорожной автоматики классифицируются на типы и классы (подобно тому, как это сделано в системах автоматизированного проектирования схемных решений железнодорожной автоматики [28]).

Число типов и классов устройств железнодорожной автоматики невелико. Выше рассмотрены три основных типа напольного оборудования железнодорожной автоматики — рельсовые цепи, стрелочные электроприводы и светофоры. Классы — конкретные виды данных устройств. В рассматриваемом примере использован класс тональных рельсовых цепей, электроприводов марки СП-6М с двигателем переменного тока и входной пятизначный светофор. Требуется описать исходные формулировки вопросов единожды для конкретного типа и класса устройств железнодорожной автоматики.

Алгоритм постановки начальных вопросов следующий.

1. Устройства железнодорожной автоматики разделяются на множества типов $T = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$ и классов внутри них $C^{T_i} = \{C_1^{T_i}, C_2^{T_i}, \dots, C_{k_i}^{T_i}\}$, $C^{T_i} \in \{T_i\}$.
2. Для каждого типа и класса устройств составляется классификатор состояний (исправное, работоспособное, предотказное, неисправное защитное, неисправное опасное состояния): $S^{T_i, C^{T_i}} = \{S_1^{T_i, C^{T_i}}, S_2^{T_i, C^{T_i}}, \dots, S_{q_i}^{T_i, C^{T_i}}\}$.
3. Каждому состоянию сопоставляется множество диагностических параметров с допустимыми пределами изменения для точной идентификации нахождения объекта в данном состоянии.
4. Для каждого конкретного объекта автоматики из заданного типа и класса осуществляется настройка граничных значений диагностических параметров,

например, в автоматическом режиме с помощью самонастраиваемых сетей (автокодировщиков) [29].

5. Для каждого конкретного объекта мониторинга автоматически выбирается множество допустимых вопросов согласно действующему режиму эксплуатации и формируются массивы цен вопросов и весов событий. Первоначально это делается исходя из общих статистических данных, широко известных для каждого из устройств. В процессе эксплуатации системы мониторинга для конкретного объекта автоматики происходит корректировка значений цен вопросов и весов событий с учетом накапливаемых исторических данных о нем.

Здесь следует отметить, что каждому состоянию какого-либо объекта диагностирования соответствует конкретное множество диагностических признаков Δ_{S_r} , зафиксированных системой мониторинга — значений диагностических параметров в совокупности, в т. ч. с учетом результатов машинного анализа и предыдущих изменений [30].

Утверждение 1. *Чтобы система технического диагностирования и мониторинга однозначно интерпретировала полученное множество значений диагностических признаков с каким-либо конкретным состоянием объекта диагностирования, это множество не должно быть собственным подмножеством диагностических признаков, соответствующим другому техническому состоянию:*

$$\forall s_a : \Delta_{S_a} \not\subset \Delta_{S_x}, a \in \{1, 2, \dots, m\}, x \in \{1, 2, \dots, m\} \setminus \{a\}. \quad (1)$$

Если условие (1) не выполняется хотя бы для одной пары технических состояний, то в автоматическом режиме система мониторинга не сможет определить то состояние, в котором реально находится объект диагностирования. Это потребует дополнительных ручных измерений. В динамических вопросниках такие события окажутся в одном подмножестве исходов вопроса.

При невозможности разделения каких-либо состояний нужны дополнительные измерения по определенному алгоритму.

Утверждение 2. *Множество состояний $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ разделимо в том случае, если*

$$\forall s_i, i \in \{1, 2, \dots, r\} \exists \pi_j \in \Theta, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (2)$$

где π_j — результативная проверка.

Результативная проверка может последовать после автоматического измерения, а может быть следствием ручного тестирования объекта диагностирования сервисным персоналом. В этом случае система мониторинга будет давать эксплуатационному персоналу информационные сообщения, облегчающие идентификацию неисправностей.

Таким образом, сам процесс формализации исходных вопросов реализуется единожды для каждого типа и класса устройств железнодорожной автоматики

экспертным методом. Далее система мониторинга сама формирует допустимые последовательности вопросов для каждого режима эксплуатации с учетом оптимизации вопросника наиболее эффективным методом. Поскольку вопросники, приведенные для типовых устройств напольной автоматизации, как правило, содержат вопросы с малыми значениями оснований, эффективным может оказаться метод корневого вопроса, разработанный проф. А. Ю. Аржененко для бинарных вопросников в [21] и адаптированный авторами данной статьи в [31] для использования применительно к вопросникам с различными основаниями. Задача оптимизации вопросника должна решаться в программном обеспечении системы мониторинга оперативно, поэтому можно также использовать известные приближенные методы оптимизации. Пользователь системы мониторинга не видит всех процедур по оптимизации, а получает только конечный результат поиска — конкретное состояние устройства и неисправного компонента при отказе или рекомендуемую последовательность дополнительных проверок для локализации неисправности.

10. Архитектура системы мониторинга

В настоящее время системы мониторинга в области железнодорожного транспорта строятся по архитектуре, включающей удаленный облачный сервер для обработки диагностической информации, а вся обработка заключается лишь в сравнении обособленных измеренных параметров с некоторым предустановленным порогом (нормалью) [4]. Более сложный анализ параметров на железных дорогах используется только «кустарно» и массового внедрения не получил. Однако методы анализа, в т. ч. с использованием искусственного интеллекта, довольно хорошо развиты [32–34].

На рисунке 12 представлена перспективная архитектура системы мониторинга.

В структуре системы мониторинга диагностические данные обо всех диагностических параметрах поступают от измерительных контроллеров с установленным периодом опроса датчиков в хранилище данных (концентратор). Там же хранятся данные учета физических особенностей и условий эксплуатации конкретного объекта. По специальному протоколу к хранилищу обращается облачный сервер обработки больших объемов данных и в режиме реального времени анализирует диагностические данные. В случае фиксации какой-либо неисправности (любого нарушения штатной работы устройств) в программном обеспечении системы мониторинга формируются динамические вопросники, из которых автоматически определяется рекомендуемая последовательность для возникшего инцидента (в т. ч. алгоритм диагностирования). Для вывода данных применяется виртуальное технологическое окно (аналог автоматизированного рабочего места), к которому можно подключиться удаленно с любого мобильного и стационарного устройства, подключенного к Интернету. Сис-

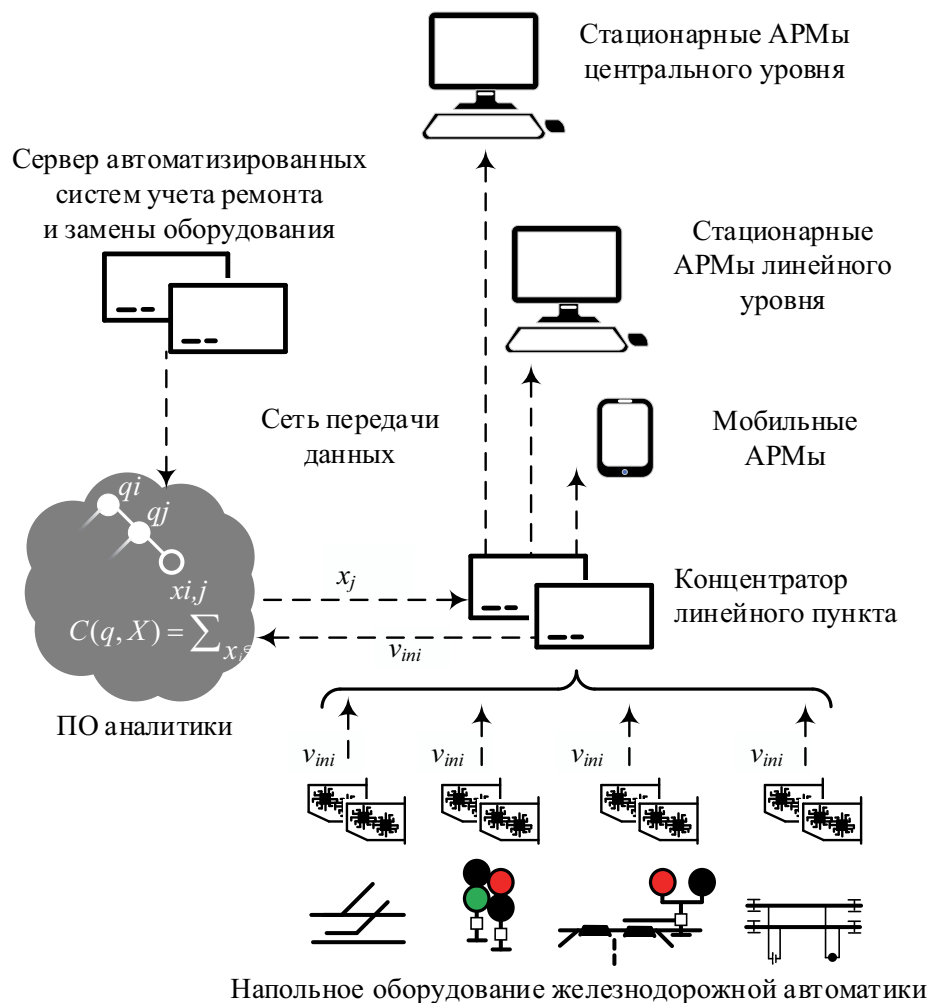


Рис. 12. Архитектура системы мониторинга

ма может дополняться стационарным автоматизированным рабочим местом, а также мобильными приложениями мониторинга. Такая архитектура системы мониторинга не требует наличия концентраторов центральных постов, как в современных системах мониторинга устройств железнодорожной автоматики [4]. Доступ к результатам мониторинга осуществляется удаленно через любой браузер или мобильное приложение вне зависимости от места расположения пользователя.

Заключение

Использование динамических вопросников позволяет подходить к процессу построения алгоритмов диагностирования современных систем со сложными структурами и большим количеством компонентов гораздо точнее. С учетом работы в программных средствах систем мониторинга, имеющих доступ к большим объемам статистических данных об объектах диагностирования

и к собранным диагностическим данным, появляется возможность повышения полноты и глубины технического диагностирования. Кроме того, сам динамический вопросник в программных средствах систем мониторинга формирует рекомендуемую последовательность действий при разборе инцидента. Это основа систем поддержки принятия решений техническим персоналом. Использование программных средств с интегрированными в них динамическими вопросниками для устройств автоматики благодаря облачным технологиям помогает организовать простой доступ к результатам мониторинга через любые браузеры и мобильные приложения. Он осуществляется с применением киберзащищенных протоколов, процедур идентификации и аутентификации пользователей согласно ранжированию пользователей и их индивидуальным настройкам.

Достоинства динамических вопросников состоят в том, что для любого технического объекта можно более точно строить алгоритм диагностирования с учетом как физических параметров и условий эксплуатации, так и накопленных статистических данных о работе и информации от датчиков измерительных контроллеров. Следует отметить и недостатки применения вопросников для построения алгоритмов диагностирования — число диагностических событий и вопросов для их идентификации существенно влияет на скорость оптимизации вопросника. В зависимости от режима эксплуатации объекта диагностирования вопросники могут иметь различные структуры и цены обхода. Поэтому в реальных приложениях необходимо учитывать ограничение по времени построения вопросника, а при необходимости применять методы декомпозиции или построения вопросников, приближенных к оптимальным.

В заключение также отметим, что представленные результаты являются одним из приложений теории вопросников. Использование динамических вопросников возможно и в других отраслях науки и техники.

Библиографический список

1. *Reakes M.* Management of Integrated Training Systems//IEEE Conference on Aerospace and Electronics, Dayton, OH, USA, 21–25 May 1990. – Vol. 2. – Pp. 924–928. – DOI: 10.1109/NAECON.1990.112894.
2. *Stanley P.* ETCS for Engineers. – Germany, Hamburg, EurailPress. – 2011. – 312 p.
3. *Hall C.* Modern Signalling: 5th edition. – UK, Shepperton: Ian Allan Ltd. – 2016. – 144 p.
4. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2016. – 171 с.
5. *Pan D., Zheng Y., Zhang C.* On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29–31 July 2010. – Pp. 4471–4476.
6. *Кокурин И. М.* Построение интеллектуальной системы управления движением поездов на основе автоматизации диспетчерского регулирования и центрального автоведения//Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 305–314.

7. Баранов Л. А. Ограничения на управление в автоматизированных системах планирования и управления движением поездов метрополитена//Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 319–330.
8. Никульчиков П. М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена//Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 456–473.
9. Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control//Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, 14–17 September 2018. – Pp. 140–146. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524676.
10. Sedykh D., Gordon M., Zuyev D., Skorokhodov A. Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology//Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, 14–17 September 2018. – Pp. 703–710. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524605.
11. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance//Signal+Dracht. – 2018. – Issue 9. – Pp. 70–75.
12. Efanov D. V., Osadchy G. V., Khóroshev V. V., Shestovitskiy D. A. Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects//Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, 13–16 September 2019. – pp. 162–170. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.
13. Flammini F. Railway Safety, Reliability and Security: Technologies and Systems Engineering. – IGI Global. – 2012. – 462 p.
14. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем//Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
15. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3e^d Edition. – Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH. – 2020. – 552 p.
16. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Шаманов В. И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие//Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2017. – 318 с.
17. Пархоменко П. П. Теория вопросников (обзор)//Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 4. – С. 140–159.
18. Picard C. F. Graphs and Questionnaires. – Netherlands: North-Holland Publishing Company. – 1980. – 431 p.
19. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). – М.: Энергоатомиздат. – 1981. – 320 с.
20. Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V., Belyi A. A. Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics//Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, 14–17 September 2018. – Pp. 237–245. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.
21. Аржененко А. Ю., Чугаев Б. Н. Оптимальные бинарные вопросники. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 128 с.
22. Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Павлов А. Н. Теория вопросников и поиск неисправностей в УКСПС//Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 1. – С. 30–33.
23. Efanov D. V., Khóroshev V. V. Ternary Questionnaires//Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia. 13–16 September 2019. – Pp. 289–300. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884404.

24. Ефанов Д. В., Хорошев В. В. Тернарные вопросники с ошибками и неопределенными ответами//Известия вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 10. – С. 875–885. – DOI: 10.17586/0021–3454–2019–62–10–875–885.
25. Ефанов Д. В., Мячин В. Н., Осадчий Г. В., Зуева М. В. Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры//Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 2. – С. 35–40.
26. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В. «Зеленые» технологии на железнодорожном транспорте//Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 12. – С. 13–16. – DOI: 10.34649/AT.2019.12.12.003.
27. Baratov D. K., Aripov N. M., Ruziev D. Kh. Formalized Methods of Analysis and Synthesis of Electronic Document Management of Technical Documentation Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia. 13–16 September 2019. – Pp. 531–539. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884415.
28. Sedych D., Gordon M., Efanov D. Computer-Aided Design of Railway Signalling Systems in Russian Federation//Proceedings of 4th International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia. 15–18 May 2018. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728662.
29. Liou C.-Y., Cheng C.-W., Liou J.-W., Liou D.-R. Autoencoder for Words//Neurocomputing. – 2014. – Vol. 139. – Pp. 84–96. – DOI:10.1016/j.neucom.2013.09.055.
30. Ефанов Д. В., Хорошев В. В. Принципы совершенствования информационного обеспечения систем технического диагностирования и непрерывного мониторинга//Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13. – № 5. – С. 41–48. – DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10270.
31. Ефанов Д. В., Хорошев В. В. Метод упорядочения процедур разбиения состояний процедурами с двумя и тремя исходами с учетом их стоимости и весов состояний//Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19. – № 1. – С. 218–243. – DOI: 10.15622/sp.2020.19.1.8.
32. Jin W., Shi Z., Siegel D., Dersin P., Douziech C., Pagnaloni M., La Cascia P., Lee J. Development and Evaluation of Health Monitoring Techniques for Railway Point Machines//2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM). Austin, TX, USA, 22–25 June 2015. – DOI: 10.1109/ICPHM.2015.7245016.
33. Böhm T. Remaining Useful Life Prediction for Railway Switch Engines Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines//International Journal of Prognostics and Health Management 8 (Special Issue on Railways & Mass Transportation). – December 2017. – 15 p.
34. Asada T. Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines//University of Birmingham, UK, Ph. D. thesis. – May 2013. – 149 p.

Dmitry V. Efanov, D.Sc.

LLC STC "Integrated Monitoring Systems", St. Petersburg

Graduate School of Transport

Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

Department "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport"

Russian University of Transport, Moscow

V.V. Khoroshev

Department "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport",

Russian University of Transport, Moscow

DYNAMIC QUESTIONNAIRES FOR ORGANIZATION OF DECISION SUPPORT SYSTEMS INTEGRATED INTO SOFTWARE DIAGNOSIS AND MONITORING RAILWAY AUTOMATION DEVICES

The features of decision support systems in relation to the field of railway transport are considered. The most vulnerable links of the technological process of transportation are highlighted and the ways of improving the upper level of analysis, organization and management of traffic, taking into account the restrictions on the time of decision-making in conflict and emergency situations, are discussed.

It is proposed to use the methods of the theory of questionnaires in the development and improvement of software for decision support systems, integrated into the software of existing and developed systems of technical diagnostics and monitoring. Detailed examples are given in the field of railway automation and remote control. The necessity of constructing questionnaires with dynamic parameters of event weights, prices and basis of questions and the number of questions is noted.

Dynamic questionnaires are the mathematical basis of diagnostic algorithms and are described at the software level of decision support systems and use historical and statistical parameters for automatic optimization, as well as data obtained promptly in real time. The use of questionnaire theory methods is a reasonable step in improving the software of decision support systems.

Automation of the processing of diagnostic information makes it possible to move from data accumulation systems (which are actually modern monitoring systems in the field of transport and, directly, railway automation) to technical diagnostics and monitoring systems that help to carry out diagnostics and forecasting procedures. This, in turn, becomes the basis for establishing the residual life of the diagnostic objects.

Decision support systems; railway transport; traffic control; technical diagnostics and monitoring of control devices; questionnaire theory; optimization; time constraints

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136

References

1. Reakes M. Management of Integrated Training Systems. *IEEE Conference on Aerospace and Electronics*, Dayton, OH, USA, 21–25 May 1990, vol. 2, pp. 924–928.
2. Stanley P. (2011) *ETCS for Engineers*. Germany, Hamburg, EurailPress Publ., 312 p.
3. Hall C. (2016) *Modern Signalling: 5th edition*. UK, Shepperton, Ian Allan Ltd Publ., 144 p.
4. Efanov D. V. (2016) *Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices]. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 171 p. (In Russian)
5. Pan D., Zheng Y., Zhang C. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent System. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, 29–31 July 2010, pp. 4471–4476.
6. Kokurin I. M. (2018) Postroyeniye intellektual'noy sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov na osnove avtomatizatsii dispetcherskogo regulirovaniya i tsentral'nogo avtovedeniya [Construction of an intelligent train control system based on the automation of dispatch control and central automatic train operation]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], vol. 4, no. 3, pp. 305–314. (In Russian)
7. Baranov L. A. (2016) Ogranicheniya na upravleniye v avtomatizirovannykh sistemakh planirovaniya i upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena [Restrictions on control in automated

- systems for planning and controlling the movement of subway trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 2, no 3, pp. 319–330. (In Russian)
8. Nikulchikov P. M. (2016) Istoriya, sostoyaniye i perspektivy razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya poyezdami metropolitena [History, state and development prospects of automatic control systems for subway trains]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], vol. 2, no. 3, pp. 456–473. (In Russian)
 9. Shamanov V. Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, 14–17 September 2018, pp. 140–146.
 10. Sedykh D., Gordon M., Zuyev D., Skorokhodov A. Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, 14–17 September 2018, pp. 703–710.
 11. Heidmann L. (2018) *Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance* Signal+Draht, iss. 9, pp. 70–75.
 12. Efanov D. V., Osadchy G. V., Khóroshev V. V., Shestovitskiy D. A. Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, 13–16 September 2019, pp. 162–170.
 13. Flammini F. (2012) *Railway Safety, Reliability and Security: Technologies and Systems Engineering*. IGI Global Publ., 462 p.
 14. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. (1994) Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh sistem [Security Methods for Discrete Systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], no. 8, pp. 3–50. (In Russian)
 15. Theeg G., Vlasenko S. (2020) *Railway Signalling & Interlocking*: 3rd edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH Publ., 552 p.
 16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017) *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: uchebnoye posobiye* [Reliability of systems of railway automation, telemechanics and communication: learning guide]. Edited by Sapozhnikov V. I. Moscow, Federal Government Budgetary Institution for further vocational education. Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and methodological center for education in railway transport] Publ., 318 p. (In Russian)
 17. Parkhomenko P. P. (1970) Teoriya voprosnikov: obzor [Questionnaire theory: review] *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], no. 4, pp. 140–159. (In Russian)
 18. Picard C. F. (1980) *Graphs and Questionnaires*. Netherlands, North-Holland Publishing Company Publ., 431 p.
 19. Parkhomenko P. P., Soghomonyan E. S. (1981) *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 320 p. (In Russian)
 20. Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V., Belyi A. A. *Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics* Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, 14–17 September 2018, pp. 237–245.
 21. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1989) *Optimal'nyye binarnyye voprosniki* [Optimal binary questionnaires], Moscow, Energoatomizdat Publ., 128 p. (In Russian)

22. Sapozhnikov V.I., Efanov D. V., Pavlov A. N. (2012) Teoriya voprosnikov i poisk neispravnostey v ustroystvakh dlya kontrolya skhoda podvizhnogo sostava [Questionnaire theory and troubleshooting in rolling stock derailment control devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 1, pp. 30–33. (In Russian)
23. Efanov D. V., Khoroshev V. V. Ternary Questionnaires. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia. 13–16 September 2019, pp. 289–300.
24. Efanov D. V., Khoroshev V. V. (2019) Ternarnyye voprosniki s oshibkami i neopredelennymi otvetami [Ternary questionnaires with errors and undefined answers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. [Journal of Instrument Engineering], vol. 62, no. 10, pp. 875–885. (In Russian)
25. Efanov D. V., Myachin V. N., Osadchiy G. V., Zueva M. V. (2020) Vybór sposoba fil'tratsii diagnosticheskikh dannykh v sistemakh nepreryvnogo monitoringa ob'yektov transportnoy infrastruktury [Method choosing a method for filtering diagnostic data in continuous monitoring systems of transport infrastructure objects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], no. 2, pp. 35–40.
26. Efanov D. V., Osadchiy G. V. (2019) «Zelenyye» tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte [Green technologies in railway transport]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no.12, pp. 13–16.
27. Baratov D. K., Aripov N. M., Ruziev D. Kh. Formalized Methods of Analysis and Synthesis of Electronic Document Management of Technical Documentation. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia. 13–16 September 2019, pp. 531–539.
28. Sedykh D., Gordon M., Efanov D. Computer-Aided Design of Railway Signalling Systems in Russian Federation. *Proceedings of 4th International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, Russia. 15–18 May 2018, pp. 1–7.
29. Liou C.-Y., Cheng C.-W., Liou J.-W., Liou D.-R. Autoencoder for Words. *Neurocomputing*, 2014, vol. 139, pp. 84–96.
30. Efanov D. V., Khoroshev V. V. (2019) Printsipy sovershenstvovaniya informatsionnogo obespecheniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i nepreryvnogo monitoringa [Principles of improving information support for technical diagnostics and continuous monitoring systems]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport], vol. 13, no. 5, pp. 41–48.
31. Efanov D. V., Khoroshev V. V. (2020) Metod uporyadocheniya protsedur razbiyeniya sostoyaniy protsedurami s dvumya i tremya iskhodami s uchetom ikh stoimosti i vesov sostoyaniy [Method of ordering procedures for splitting states by procedures with two and three outcomes, taking into account their cost and state weights]. *Trudy SPIIRAN* [Works of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences], vol. 19, no. 1, pp. 218–243.
32. Jin W., Shi Z., Siegel D., Dersin P., Douziech C., Pugnaroni M., La Cascia P., Lee J. (2015) Development and Evaluation of Health Monitoring Techniques for Railway Point Machines. *2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*. Austin, TX, USA, 22–25 June.
33. Böhm T. (2017) Remaining Useful Life Prediction for Railway Switch Engines Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines. *International Journal of Prognostics and Health Management 8 (Special Issue on Railways & Mass Transportation)*, December, 15 p.

34. Asada T. (2013) *Novel Condition Monitoring Techniques Applied to Improve the Dependability of Railway Point Machines*. University of Birmingham, UK, Ph. D. thesis. May, 149 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 13.07.2020, принята к публикации 10.08.2020*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович — д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ХОРОШЕВ Валерий Вячеславович — ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)
e-mail: hvv91@icloud.com

© Ефанов Д. В., Хорошев В. В., 2021

УДК 004.09+001.92

**В. В. Сапожников, д-р техн. наук,
Вл. В. Сапожников, д-р техн. наук**

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

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

*ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург
Высшая школа транспорта
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Санкт-Петербургского политехнического университета
Петра Великого, Санкт-Петербург
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь
на железнодорожном транспорте»
Российский университет транспорта, Москва*

ИТЕРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАУКОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ПОЛНОГО МНОЖЕСТВА ЦИТИРУЕМЫХ РАБОТ

Проанализированы широко известные наукометрические показатели, основанные на учете числа цитирований работ ученого. Предложены некоторые способы формирования нового наукометрического показателя, учитывающие полное множество цитирований работ ученого. Эти способы имеют простую и понятную геометрическую интерпретацию и дают значения показателей в виде единственного числа, что удобно с позиции сравнения показателей различных ученых и формирования рейтингов. Продемонстрирована эффективность использования итерационного принципа формирования индекса цитируемости, при котором выделяется некоторое количество первых работ в ранжированном в порядке невозрастания числа цитирований перечне работ ученого, усреднение числа цитирований, исключение из рассмотрения этих работ и повторение всех процедур с заданным способом выделения первых работ на каждом шаге итерации. Способ выделения первых работ из списка позволяет выделить основание цепи промежуточных показателей.

В работе авторов предлагается в качестве основания брать индекс Хирша на каждом шаге итерации (выделять основание Хирша) и строить цепь убывающих индексов с усреднением числа цитирований на каждой итерации. Такой подход позволяет более полно учесть вклад ученого в развитие соответствующей предметной области. В качестве основания может выбираться и другое число, например, осуществляться определение индекса Эгге или Михайлова. Основание может быть и переменным – в статье рассмотрены такие случаи. Расчеты, приведенные в ней, дополняются экспериментальными результатами, полученными при использовании статистической информации из базы данных российского индекса научного цитирования. Предложенный

итерационный способ формирования индекса цитирования позволяет осуществлять «настройку» индекса и, при необходимости, не учитывать малоцитируемые работы или учитывать только определенный процент цитирований от общего их количества. Это может быть актуальным для конкретных предметных областей науки и научных или образовательных организаций.

Оценка деятельности ученых, наукометрические показатели, учет числа цитирований, индекс Хирша, индекс Эгге, индекс Михайлова

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-137-166

Введение

С развитием компьютерной техники и информационных технологий появилась возможность не только доступа к большому объему научных материалов (препринтов, статей, монографий, результатов исследований и пр.), но и различного рода оценки деятельности ученых. В этой связи особое внимание уделяется индивидуальным показателям деятельности ученых, позволяющим оценить их вклад в конкретную предметную область [1–5]. Существуют десятки наукометрических показателей, учитывающих ту или иную «деталь» в деятельности ученых: число опубликованных работ, количество цитирований каждой из них, вклад соавторов, уровень издания, конкретную тематику научных работ и т. д. [6–10]. Учеными по всему миру вводятся наукометрические показатели и модифицируются уже известные. В отдельных организациях создаются специализированные издания, освещающие основные достижения в области наукометрии и управления научной деятельностью [11–20].

Подавляющее большинство, если не все наукометрические показатели не позволяют оценить «на равных» вклад ученых в различных областях науки. К примеру, абсолютно бесполезно сравнивать наукометрические показатели из области биологии и из области автоматизации: в первой работает куда большее количество ученых и публикуется гораздо большее число научных работ, чем во второй. Однако термин «оценка научной деятельности» достаточно часто упоминается в научных организациях и учебных заведениях, а наукометрические показатели становятся чуть ли не основным мерилом работы сотрудников. Более того, вопросы наукометрии в управлении научной деятельностью регламентируются на государственном уровне. Так, в Российской Федерации (как и в подавляющем большинстве стран) приоритет в оценке результативности и эффективности деятельности ученых отдается числу публикаций в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science (США) и Scopus (ЕС). Это зафиксировано в постановлении Правительства РФ от 8 апреля 2009 года № 312 «Об оценке и о мониторинге результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения». Есть и более свежий документ — «Методика расчета качественного показателя государственного задания “Комплексный балл публикационной результативности”» (утвержден Минобрнауки РФ 30 декабря 2019 года).

Среди разнообразия вспомогательных показателей оценки деятельности ученых наиболее популярным является индекс Хирша (h -индекс), предложенный профессором физики Калифорнийского университета в Сан-Диего Хорхе Хиршем в 2005 году [2]. Ученый имеет h -индекс, равный h , в том случае, если h его работ процитированы не менее чем h раз, а остальные $Q-h$ работ цитируются не более чем h раз. Индекс Хирша имеет и достоинства и недостатки, отмеченные как самим первооткрывателем в первой работе, так и в публикациях других ученых, развивавших и развивающих идею Хирша [7, 9, 13, 14]. Так, индекс Хирша учитывает число наиболее цитируемых публикаций ученого, но никак не учитывает те работы, которые оказываются за пределами первых h работ.

Данная статья освещает результаты исследований авторов в области построения нового показателя оценки деятельности ученых на основе учета всех цитирований всех его работ. За пределами исследований остались возможные вариации с учетом количества соавторов, уровня издания, числа самоцитирований и пр. Эти вопросы актуальны и поднимаются в большом числе предыдущих публикаций и с легкостью могут быть адаптированы к использованию с предлагаемыми показателями. Следует также отметить, что все рассуждения далее дополняются результатами экспериментов с выборками из базы данных российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Но предлагаемые показатели могут рассчитываться и для других баз данных, вплоть до использования только внутри отдельных организаций с их репозиториями.

1. Известные наукометрические показатели

Во введении отмечается, что наиболее известным наукометрическим показателем является индекс Хирша [2]. Он имеет довольно простую геометрическую интерпретацию. Если ранжировать все работы автора, имеющиеся в определенной базе данных, по невозрастанию числа их цитирований, и нанести работы в виде точек на координатной плоскости, где оси абсцисс будут соответствовать научным работам (q_i), а оси ординат — число их цитирований (число n_i), то можно выделить квадрат с длиной стороны h . Этот квадрат (h -квадрат Хирша) будет учитывать h^2 цитирований первых h научных работ ученого. Однако все остальные работы и их цитирования окажутся за пределом данного квадрата.

Зададимся произвольным статистическим рядом, охватывающим результаты деятельности некоторого абстрактного ученого, и ранжируем их в порядке невозрастания числа цитирований научных работ (табл. 1). Всего ученым опубликованы 32 научные работы, процитированные 209 раз.

Располагая представленные в таблице 1 данные на координатной плоскости в виде точек, получаем геометрическую интерпретацию деятельности ученого. На данной плоскости нетрудно выделить квадрат Хирша. Длина его стороны для рассматриваемого случая равна $h=8$. Таким образом, индекс Хирша учитывает в рассматриваемом примере $h^2=64$ цитируемости ученого. Это составляет чуть

Таблица 1. Исходные данные к примерам

Номера работ в ранжированном списке															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Число цитирований каждой работы															
16	15	15	14	13	12	10	9	8	8	8	7	7	6	6	6
Номера работ в ранжированном списке															
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Число цитирований каждой работы															
5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	2	2	1	1	0

более 30 % от общего числа цитирований работ ученого. При этом неучтенными остались 40 цитирований первых восьми работ (как раз образующих квадрат Хирша), находящихся над квадратом Хирша, что составляет около 20 % цитирований всех работ ученого, а также 105 цитирований работ из области, расположенной справа от квадрата Хирша, что составляет около 50 % цитирований всех работ ученого. Индекс Хирша учел только малую часть деятельности ученого, выделив лишь наиболее популярные работы автора. Остальные работы оказались фактически исключены (как будто автор их никогда не публиковал).

Индекс Хирша как раз и задумывался автором для выделения наиболее популярных работ, однако в дальнейшем так прочно вошел в обиход, что сегодня оказывается важнейшим показателем, на который ориентируются во всем мире. Для выделения среди научных работ автора самых популярных публикаций был разработан аналог h -индекса, вычисляемый следующим образом [21]. Ученый имеет g -индекс, равный g , если g его работ процитированы в совокупности не менее чем g^2 раз, а $g+1$ работа цитируется уже менее $(g+1)^2$ раз. Сегодня этот индекс часто называют по имени ученого, введшего его в рассмотрение, — индекс Эгге (g -индекс). Индекс Эгге нивелирует важный минус индекса Хирша, связанный с недостаточно полным учетом наиболее популярных работ ученого. Как было показано в примере выше, индекс Хирша не учел большое число цитирований работ в области над h -квадратом.

Модифицируем индекс Эгге так, как это предложено в работе [22]: будем его определять аналогично индексу Хирша и выделять g работ с числом цитирований каждой не менее величины g^2 . Далее будем использовать только модифицированный индекс Эгге и обозначать его также через g -индекс. На рисунке 1 для тех же данных, что и в предыдущем примере, получена геометрическая интерпретация g -индекса. На плоскости сформирован прямоугольник размером $g \times g^2$, в который попадает 27 цитирований первых трех работ ученого. Назовем его g -прямоугольником Эгге. Оказались неучтенными около 9 % цитирований трех наиболее популярных работ и практически 78 % цитирований 29-ти менее популярных работ.

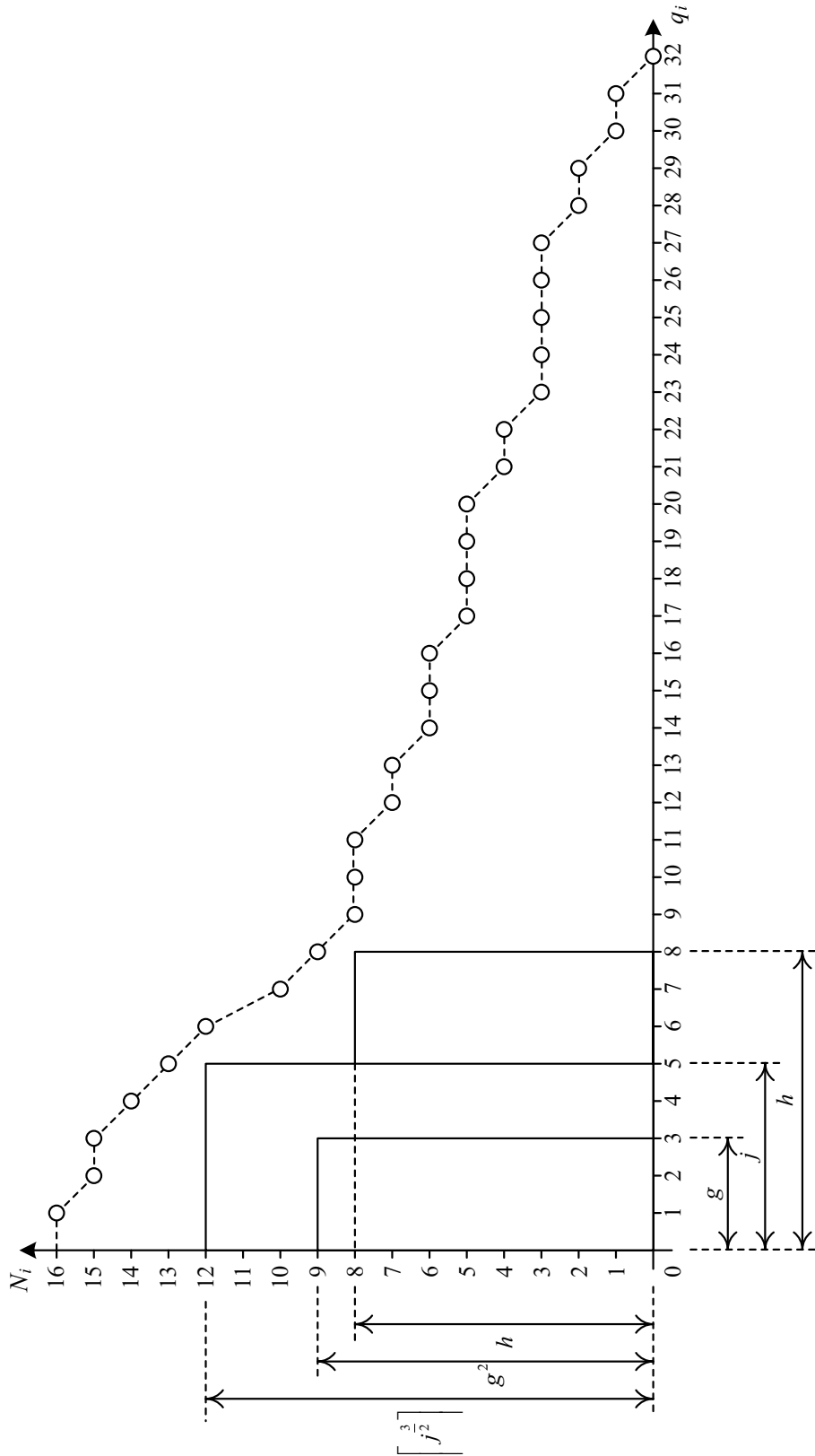


Рис. 1. Геометрическая интерпретация известных показателей цитируемости

В большом числе научных работ на тему использования h - и g -индексов, например в [22], обсуждаются вопросы целесообразности использования индекса Эгге в ряде предметных областей (даже в общенациональном масштабе), т. к. его значение даже для ведущих ученых оказывается крайне низким. Известен [22] способ модификации h - и g -индексов, позволяющий получить новый показатель цитируемости — j -индекс (индекс Михайлова). Ученый имеет j -индекс, равный j , в том случае, если j работ ученого процитированы не менее чем $j^{3/2}$ раз, а остальные $Q-j$ работ цитируются не более чем $j^{3/2}$ раз. Как показывает практика, в рассматриваемом случае гораздо труднее определить верхнюю границу числа цитирований: получаемые значения зачастую оказываются дробными. Автор данного показателя предлагает определять целое снизу от получаемой величины. Несмотря на это, поскольку индекс определяет всего лишь верхнюю границу учитываемых цитирований, можно условиться определять и целое сверху от получаемого значения $j^{3/2}$ (именно это и сделано авторами данной работы в дальнейшем изложении результатов).

Геометрически j -индекс изображается на плоскости цитирований в виде прямоугольника размером $j \times j^{\frac{3}{2}}$ — j -прямоугольника Михайлова. Получаемый прямоугольник имеет значение длины малой стороны, лежащее в промежутке $h > j > g$. Число цитирований, учитываемых j -индексом, больше, чем число учитываемых g -индексом. Для приведенного ранее примера j -индекс учитывает 60 цитирований работ (около 29 % от общего числа цитирований, что сравнимо с аналогичным показателем h -индекса). Не учтенными оказываются 13 цитирований над j -прямоугольником (примерно 6 % от общего числа цитирований) и 136 цитирований работ, расположенных в правой области от прямоугольника (примерно 65 % от общего числа цитирований).

Описанные выше показатели направлены на уточнение оценки цитируемости наиболее популярных работ ученого. Все данные показатели имеют один общий недостаток — не учитывают все цитирования наиболее популярных работ и во все обходят стороной все цитирования наименее популярных работ ученого. Отсюда следуют возможности модификации представленных индексов. Часть таких модификаций известна. Например, известен показатель, усредняющий общее число цитирований первых h работ ученого — a -Index [12]. Значение данного индекса для рассматриваемого примера равно 13.

Известны и другие разнообразные модификации индекса Хирша и различные производные показатели, основанные на цитировании работ ученого [9, 12, 13]. Все они, однако, не дают целостной картины в оценке деятельности ученого и дополняют друг друга.

Исследования показали, что эффективным является использование итерационного принципа формирования индекса цитируемости, при котором выделяется некоторое количество первых работ в ранжированном в порядке невозрастания числа цитирований перечне работ ученого, усреднение числа

цитирований, исключение из рассмотрения этих работ и повторение всех процедур с заданным способом выделения первых работ на каждом шаге итерации. Способ выделения первых работ из списка позволяет выделить основание цепи промежуточных показателей.

Далее обсуждаются результаты использования итерационного принципа формирования наукометрического показателя.

2. Итерационные методы формирования наукометрических показателей

2.1. Распределение числа цитирований между группами работ

Проанализируем возможности формирования такого наукометрического показателя, который бы учитывал все цитирования всех работ ученого. Наиболее простым представляется следующий подход.

Алгоритм 1. Правила подсчета r^δ -индекса:

1. Работы ученого ранжируются в порядке невозрастания числа их цитирований.

2. Выбирается целое число δ ($Q \geq \delta \geq 2$).

3. Работы автора в сформированном списке делятся на δ равных или примерно равных групп.

4. Для каждой группы подсчитывается среднее число цитирований работ:

$$w^i = \frac{n_\delta}{q_\delta} = \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} n_j}{q_\delta}, \quad (1)$$

где q_δ — число научных работ в группе δ ; $j_{\max}$ — максимальный индекс работы в рассматриваемой группе.

5. Подсчитывается сумма полученных показателей для каждой группы:

$$w = \sum_{i=1}^{i=\delta} w^i. \quad (2)$$

Определим r^δ -индекс для рассмотренного выше примера при $\delta=4$. Каждая из групп будет иметь по восемь научных работ. В таблице 2 приводится расчет. Для рассматриваемого примера r^δ -индекс определяется величиной 26,125, что более полно оценивает вклад ученого в предметную область.

Тем не менее, подобный показатель, хоть и более полно учитывающий число цитирований работ, не может использоваться для исчерпывающей оценки деятельности ученого. Возникает вопрос выбора числа δ , который никак не формализован. Кроме того, как видно даже из простого примера, для первой группы работ происходит существенно большее усреднение числа цитирований, чем для последующих групп.

Таблица 2. Подсчет r^4 -индекса

δ	n_δ	q_δ	w^i
1	104	8	13
2	56	8	7
3	34	8	4,25
4	15	8	1,875
w	209	32	26,125

С целью оценки особенностей подсчета r^4 -индекса авторы провели эксперименты с данными из базы РИНЦ. Выборка сделана 25 сентября 2019 года по 15 ученым, работающим в области автоматике и вычислительной техники (50.00.00 – «Автоматика. Вычислительная техника»). Для каждого ученого зафиксированы показатели цитируемости по каждой из представленных работ. Более свежая выборка не производилась, поскольку все расчеты выполнялись для различных индексов и важно было сохранить неизменными исходные данные к расчетам. В опубликованной ранее работе авторов [23] присутствуют экспериментальные результаты по данной выборке – можно провести корректное сравнение результатов.

В таблице 3 приведены полученные результаты при вычислении r^4 -индексов для выбранных 15 ученых.

Анализируя данные таблицы 3, отмечаем, что для различных ученых распределение числа цитирований между работами оказывается различным. К примеру, в первую четверть работ у ученых D , E и K попадает всего две работы, а у ученого M – три, и между ними распределена четверть всех цитирований, тогда как для других ученых это число больше. Соответственно, усреднение между малым количеством работ дает больший вклад, чем для других ученых, и существенно влияет на рейтинг. Во вторую и третью четверти попадает куда большее количество работ, что приводит к еще большему усреднению показателей цитируемости. В четвертой четверти оказывается подавляющее количество работ, однако вклад их в общее значение показателя оказывается несущественным и на рейтинг кардинально не влияющим.

2.2. Итерационный принцип подсчета наукометрического показателя

Рассмотрим другой подход к формированию показателя оценки деятельности ученого на основе цитируемости. Он подразумевает использование в качестве «основания» индекса Хирша, но базируется на итерационном принципе формирования [23, 24].

Алгоритм 2. Правила подсчета w -индекса:

1. Работы ученого ранжируются в порядке невозрастания числа их цитирований.

Таблица 3. r^A -индексы для рассмотренных ученых

Позиция при ранжировании по h -индексу	Ученый	Q	N	h	δ					n_δ				w^i				w
					1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	
1	A	329	15246	58	5	13	25	286		3557	4078	3837	3774	711,4	313,692	153,48	13,196	1191,768
2	B	240	6415	51	9	14	19	198		1561	1626	1614	1614	173,444	116,143	84,947	8,152	382,686
3	C	301	4791	45	10	14	18	259		1120	1265	1230	1176	112	90,357	68,333	4,541	275,231
4	D	387	8105	42	2	17	44	324		1976	2060	2060	2009	988	121,176	46,818	6,201	1162,195
5	E	140	5579	41	2	10	21	107		1330	1456	1396	1397	665	145,6	66,476	13,056	890,132
6	F	194	2846	41	14	18	21	141		687	737	723	699	49,071	40,944	34,429	4,957	129,401
7	G	364	4332	37	16	25	47	276		1055	1103	1105	1069	65,938	44,12	23,511	3,873	137,442
8	H	488	4228	35	22	36	88	342		1075	1056	1054	1043	48,864	29,333	11,977	3,05	93,224
9	I	108	1817	35	8	11	11	78		419	494	442	462	52,375	44,909	40,182	5,923	143,389
10	J	198	2358	34	14	16	23	145		591	582	603	582	42,214	36,375	26,217	4,014	108,82
11	K	252	6024	33	2	5	17	228		1215	1671	1629	1509	607,5	334,2	95,824	6,618	1044,142
12	L	268	3020	33	8	17	30	213		760	765	744	751	95	45	24,8	3,526	168,326
13	M	244	5284	32	3	10	30	201		1185	1418	1369	1312	395	141,8	45,633	6,527	588,96
14	N	306	4170	32	21	36	62	187		1061	1030	1054	1025	50,524	28,611	17	5,481	101,616
15	O	70	1527	32	7	8	10	45		384	358	379	406	54,857	44,75	37,9	9,022	146,529

2. Полагается $i=1$.
3. Определяются индекс Хирша ученого и число $h_i=h$.
4. Подсчитывается среднее число цитирований первых $h_i=h_1$ работ:

$$w^i = \frac{s_i}{h_i}, \quad (3)$$

где s_i — общее число цитирований h_i работ.

5. Запоминается число w^i , а первые h_i работ исключаются из рассмотрения и удаляются из множества работ и цитирований.

6. Рассматривается следующая итерация при $i:=i+1$.

7. Проверяется наличие работ в списке с цитированием больше 0. Если они есть, то повторяются пункты 3–6 алгоритма. Если нет, можно переходить к пункту 8.

8. Подсчитывается сумма полученных показателей w^i :

$$w = \sum_{i=1}^{i=k} w^i, \quad (4)$$

где k — количество итераций подсчета суммы до того, как «очередной» квадрат Хирша не будет иметь нулевую сторону ($h_i \neq 0$).

Параметр k является крайне важным. Назовем его *длиной цепи*, т. к. он определяет, какое число h -квадратов должно быть построено при вычислении w -индекса.

Приведем пример подсчета w -индекса на исходных данных, представленных в таблице 1.

Первые $h_1=h$ работ дают следующий результат:

$$w^1 = \frac{s_1}{h_1} = \frac{16+15+15+14+13+12+10+9}{8} = \frac{104}{8} = 13.$$

После удаления первых $h_1=8$ научных работ получаем таблицу 4.

Таблица 4. Ранжированные работы после удаления первых $h_1=8$ научных работ

Номера работ в ранжированном списке											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число цитирований каждой работы											
8	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5
Номера работ в ранжированном списке											
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Число цитирований каждой работы											
4	4	3	3	3	3	3	2	2	1	1	0

Индекс Хирша по данным таблицы 4 равен $h_2=6$. Таким образом, имеем:

$$w^2 = \frac{s_2}{h_2} = \frac{8+8+8+7+7+6}{6} = \frac{44}{6} = 7,333.$$

Удаляем первые $h_2=6$ работ ученого, что дает новый список, для которого повторяются указанные действия, и видим такой ряд промежуточных значений:

$$w^3 = \frac{s_3}{h_3} = \frac{27}{5} = 5,4, \quad w^4 = \frac{s_4}{h_4} = \frac{13}{3} = 4,333, \quad w^5 = \frac{s_5}{h_5} = \frac{9}{3} = 3,$$

$$w^6 = \frac{s_6}{h_6} = \frac{6}{2} = 3, \quad w^7 = \frac{s_7}{h_7} = \frac{4}{2} = 2, \quad w^8 = \frac{s_8}{h_8} = \frac{1}{1} = 1, \quad w^9 = \frac{s_9}{h_9} = \frac{1}{1} = 1.$$

Длина цепи (в данном случае — Хирша) равна $k=9$.

Суммируя значения, получаем итоговое значение w -индекса:

$$w = w^1 + w^2 + \dots + w^8 + w^9 = 40,066.$$

На рисунке 2 представлена геометрическая интерпретация w -индекса на данных описанного примера. Серым фоном выделены квадраты Хирша, получаемые на каждом этапе итерации.

Введенный w -индекс более полно учитывает все множество работ ученого. Примеры, демонстрирующие его преимущества перед известными показателями, даны в [23]. Основной недостаток w -индекса в том, что при большом числе малоцитируемых работ их вклад в значение w -индекса может оказаться весьма существенным. Поэтому один ученый, имеющий большее значение общего числа цитирований, чем другой, оказывается по критерию w -индекса в проигрышной позиции.

В таблице 5 приводятся результаты экспериментов с той же выборкой, что и ранее для h -индекса. Более полный учет деятельности ученых позволил изменить их положение в рейтинге и указать более обоснованные позиции. К примеру, ученый H имеет 676 публикаций (Q), среди которых процитировано хотя бы раз 488 работ (Q^{1+}), его индекс Хирша равен $h=35$. Аналогичный индекс Хирша имеет ученый I с числом публикаций 246, среди которых процитировано хотя бы единожды 108 работ.

В обновленном рейтинге значения w -индекса для ученых существенно разнятся: 508,633 и 126,148, что более справедливо. Индекс Хирша для большого числа ученых совпадает, тогда как w -индекс может совпасть только в очень редких случаях и всегда позволяет ранжировать ученых.

На рисунке 3 показаны два рейтинга ученых по h -индексу и предлагаемому w -индексу. Позиции ученых изменились, однако при этом учтены все цитирования всех работ, а не только h^2 цитирований первых работ.

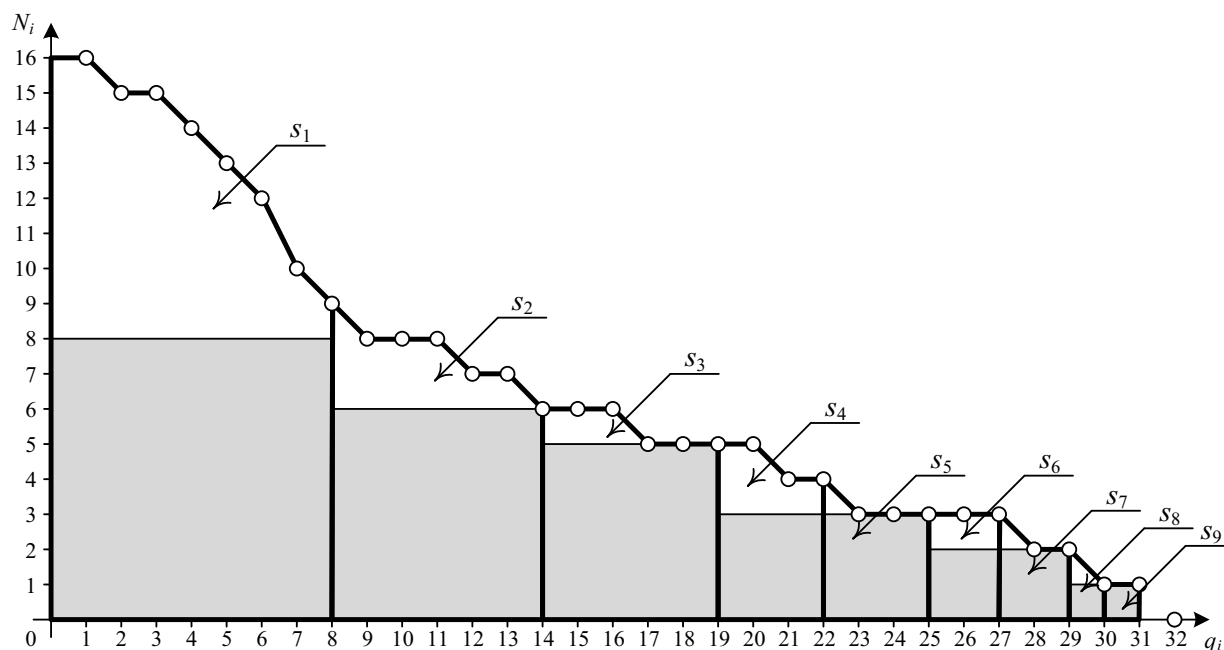


Рис. 2. Геометрическая интерпретация w-индекса

Таблица 5. w-индексы для рассмотренных ученых

Позиция при ранжи- ровании по <i>h</i> -индексу	Ученый	Q	Q^{1+}	$Q^{1+}/Q \times 100\%$	N	<i>h</i> -индекс	w-индекс
1	A	377	329	87,268	15246	58	509,996
2	B	396	240	60,606	6415	51	309,878
3	C	535	301	56,262	4785	45	352,828
4	D	491	387	78,819	8093	42	470,121
5	E	160	140	87,5	5567	41	222,192
6	F	295	194	65,763	2846	38	214,541
7	G	581	364	62,651	4332	37	400,588
8	H	676	488	72,189	4174	35	508,633
9	I	246	108	43,902	1817	35	126,148
10	J	336	198	58,929	2320	34	212,166
11	K	401	252	62,843	6025	33	380,547
12	L	386	268	69,43	3020	33	302,965
13	M	276	244	88,406	5284	32	340,489
14	N	366	306	83,607	4170	32	332,622
15	O	146	70	47,945	1527	32	88,414

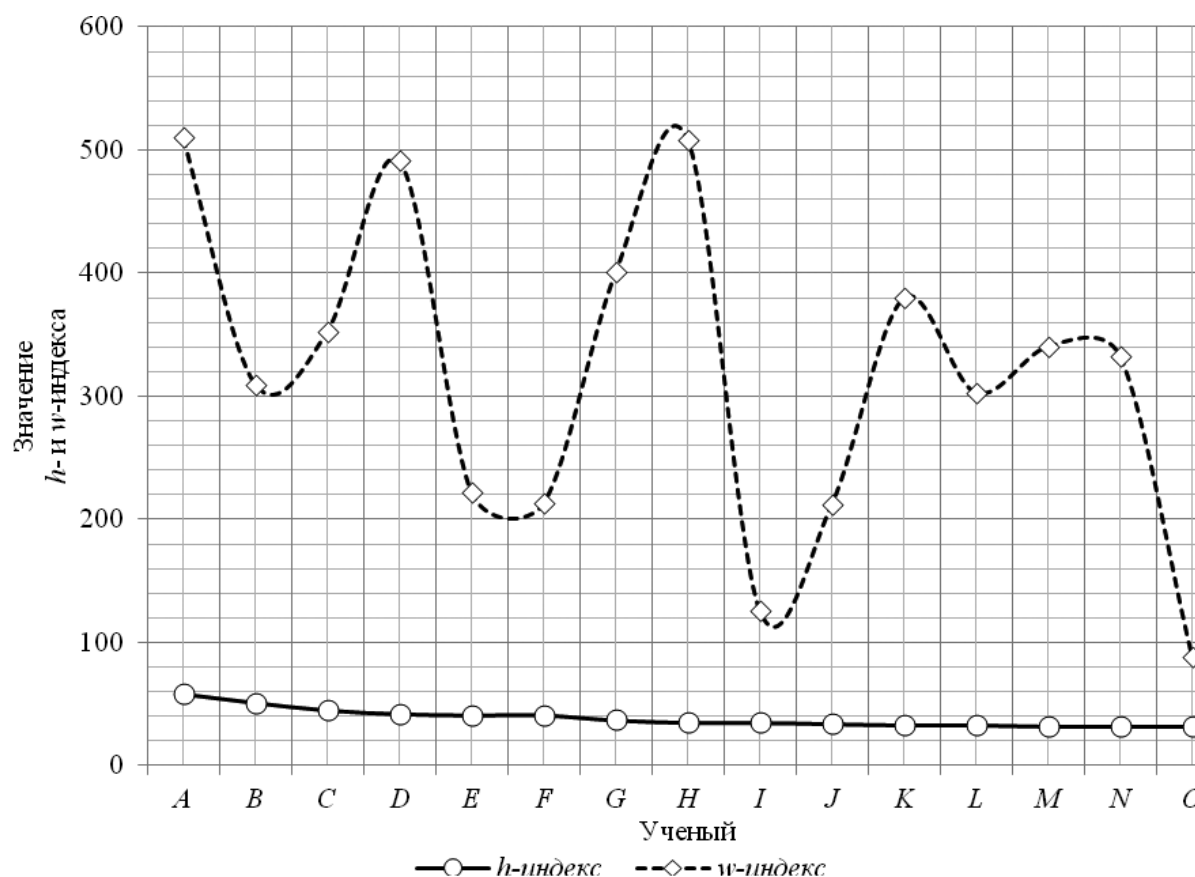


Рис. 3. Позиции ученых в рейтингах по h - и w -индексам

2.3. Использование различных оснований при формировании индекса цитирования

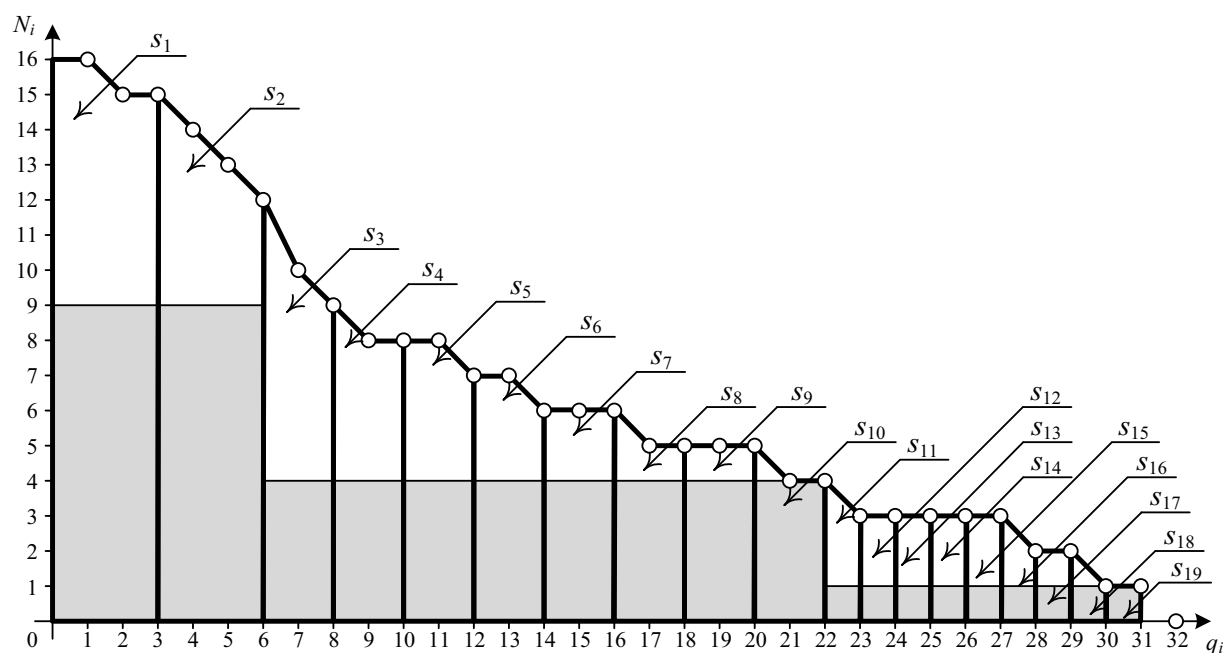
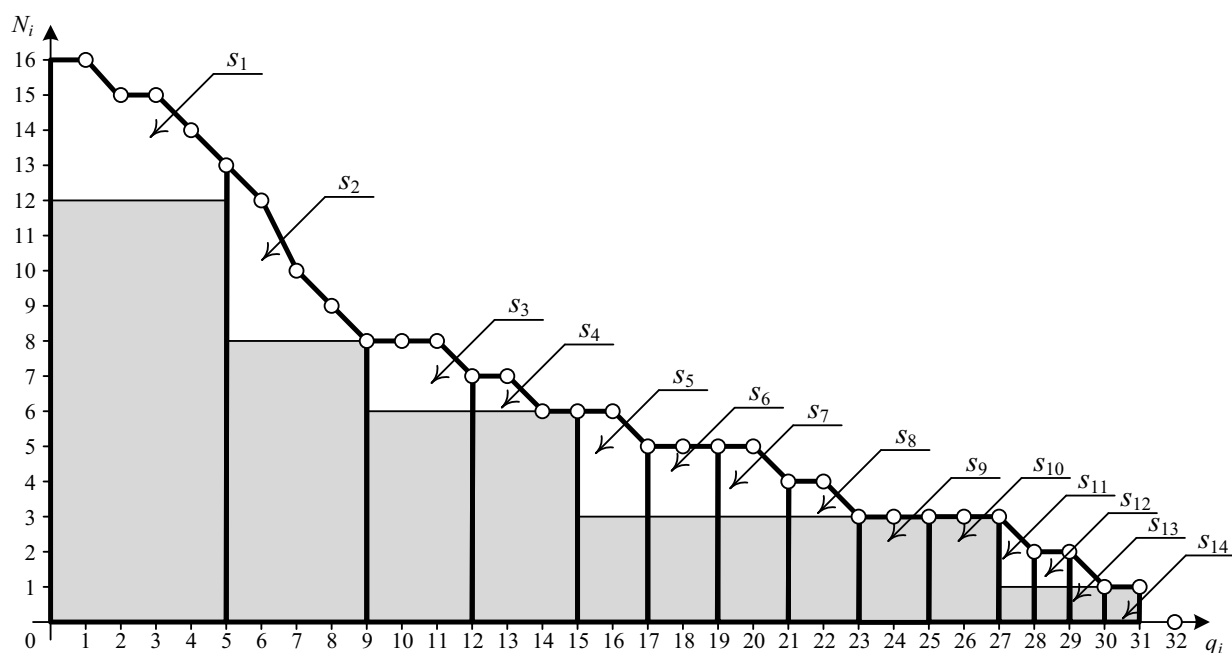
Исследования показали, что в качестве основания при формировании итерационного показателя может быть использован любой другой показатель — аналог h -индекса [25]. Обозначим основание w -индекса через β и внесем его в обозначение индекса — $w(\beta)$ -индекс.

В качестве основания берется любое число β , для которого может быть сформирован квадрат $\beta \times \beta$ или прямоугольник $\beta \times \alpha\beta$, где $\alpha\beta$ — число цитирований β -ой работы в списке работ, ранжированном в невозрастающем порядке по числу цитирований (α — любое число, $\alpha \geq 1$). Другими словами, величина β определяет некоторый базовый показатель, который используется при формировании последовательности чисел $w^1, w^2, \dots, w^k$. Сравним $w(\beta)$ -индексы с различными основаниями на примере выбора в качестве основания традиционных h -, g - и j -индексов ($w(h)$ -индекс рассмотрен в предыдущем параграфе).

Рассмотрим тот же пример, что и ранее.

На рисунках 4 и 5 показаны цепи для индексов с различными основаниями.

Длина цепи при подсчете $w(g)$ -индекса оказывается равной $k=19$. При этом прямоугольники располагаются достаточно часто, вследствие чего среднее

Рис. 4. Геометрическая интерпретация $w(g)$ -индексаРис. 5. Геометрическая интерпретация $w(j)$ -индекса

число цитирований становится более близким к общему числу цитирований работ в каждой итерации. Сравните это с особенностью формирования $w(h)$ -индекса (рис. 2). Указанное обстоятельство приводит к существенному увеличению итогового значения показателя. Для рассматриваемого примера он равен $w(g)=100,833$, что в 2,517 раза больше значения показателя $w(h)=40,066$.

Выбор в качестве основания числа j из j -индекса приводит к другому результату. Длина цепи уменьшается до величины $k=14$. Соответственно, малые длины j -прямоугольников оказываются большими, чем малые длины g -прямоугольников. Усреднение в каждой итерации оказывается более далеким, чем общее число цитирований работ в итерации. Значение $w(j)=68,85$. Это в 1,718 раза больше, чем значение $w(h)$ -индекса, и в 1,465 раза меньше, чем значение $w(g)$ -индекса для рассматриваемого примера. Общие закономерности, однако, сохраняются вне зависимости от того, какое основание установлено при формировании показателя. В таблице 6 приведены результаты подсчетов для экспериментальных данных из базы РИНЦ. Отметим тот факт, что при использовании различных оснований в процессе подсчета $w(\beta)$ -индекса характер изменения позиций в рейтинге сохраняется (рис. 6). По величине для одного ученого $w(h)$ -индекс будет иметь всегда меньшее значение, чем $w(j)$ -индекс и $w(g)$ -индекс; последний имеет самую большую величину среди трех показателей.

Таблица 6. $w(\beta)$ -индексы для рассмотренных ученых

Позиция при ранжировании по h -индексу	Ученый	Q	N	h	j	g	$w(h)$	$w(j)$	$w(g)$
1	A	329	15246	58	28	16	509,996	1117,957	1841,744
2	B	240	6415	51	21	11	309,88	642,52	1074,976
3	C	301	4791	45	19	10	352,828	682,668	1030,401
4	D	387	8105	42	18	10	491,12	1027,014	1580,698
5	E	140	5579	41	17	10	222,192	524,398	859,386
6	F	194	2846	41	12	6	212,866	459,776	721,017
7	G	364	4332	37	14	7	400,589	790,199	1184,658
8	H	488	4228	35	12	7	508,634	999,461	1279,456
9	I	108	1817	35	12	7	126,147	270,167	412,124
10	J	198	2358	34	11	6	212,166	437,275	683,203
11	K	252	6024	33	17	11	379,921	718,701	1066,92
12	L	268	3020	33	13	7	302,965	591,535	873,281
13	M	244	5284	32	17	10	340,489	680,175	1068,975
14	N	306	4170	32	12	7	332,622	762,167	1190,751
15	O	70	1527	32	12	7	88,414	198,919	320,29

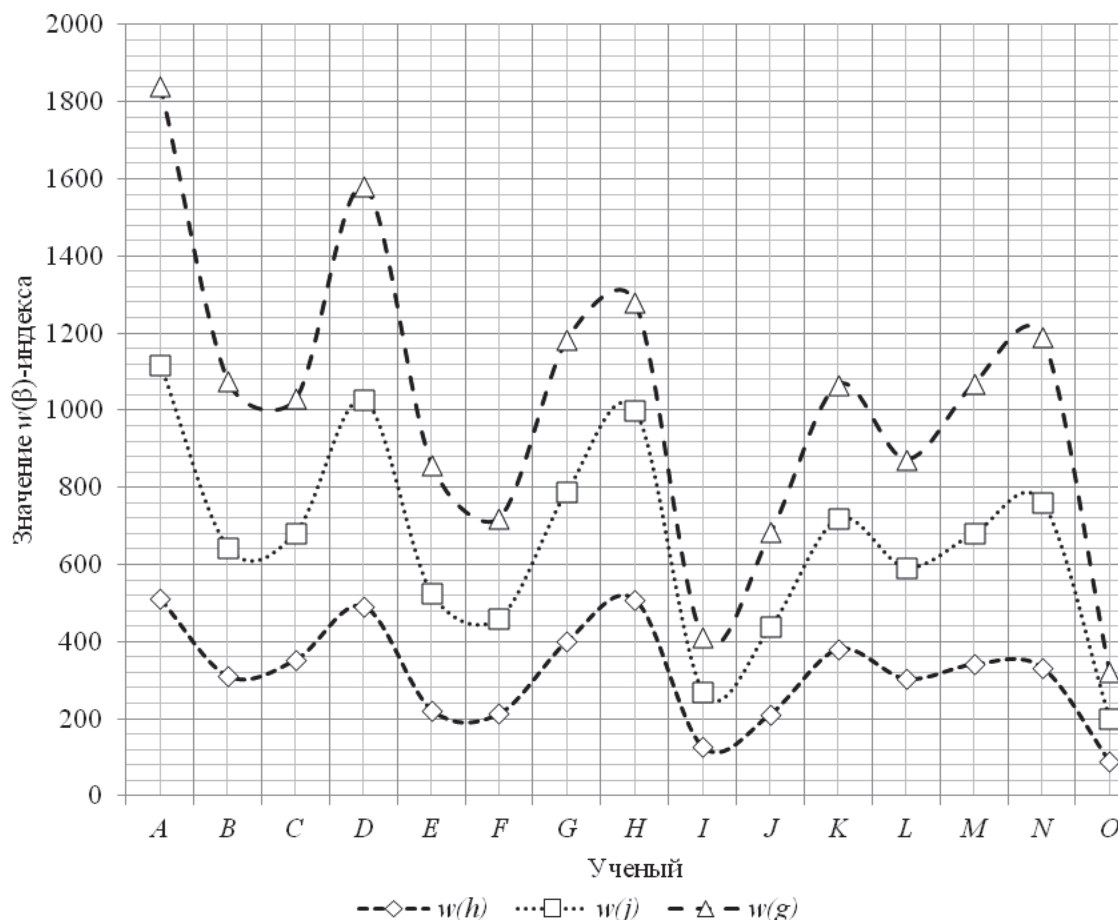


Рис. 6. Позиции ученых в рейтингах по $w(\beta)$ -индексам

2.4. Настраиваемые показатели учета цитируемости

Вернемся к основному недостатку $w(\beta)$ -индексов — большему влиянию малоцитируемых работ на значение итоговой суммы. Точнее этот фактор можно отметить как более близкое значение усреднения к числу цитирований работ в итерации с малым значением основания. С целью уменьшения этого влияния могут быть использованы различные «настройки» $w(\beta)$ -индексов, связанные с ограничением числа итераций при подсчете суммарного значения w или же с выбором в качестве оснований чисел $\alpha = a\beta$, где a — произвольное целое число. Ограничение числа итераций дает возможность учитывать только первые k итерации или же вообще отбрасывать те работы, которые процитированы определенное число раз. Аналогично способ, связанный с выбором числа α , нацело делящимся на β , дает возможность отбрасывания малоцитируемых работ. Допустим, пусть $\beta = h$, а $\alpha = 2h$, тогда на каждой итерации будут выделяться прямоугольники размером $h \times 2h$ и в случае $h = 1$ нельзя будет выделить прямоугольники для цитируемых единожды работ.

На рисунке 7 приведен график изменения значений $w(\beta)$ -индексов с различными основаниями на каждом шаге итерации для примера из таблицы 1. Пред-

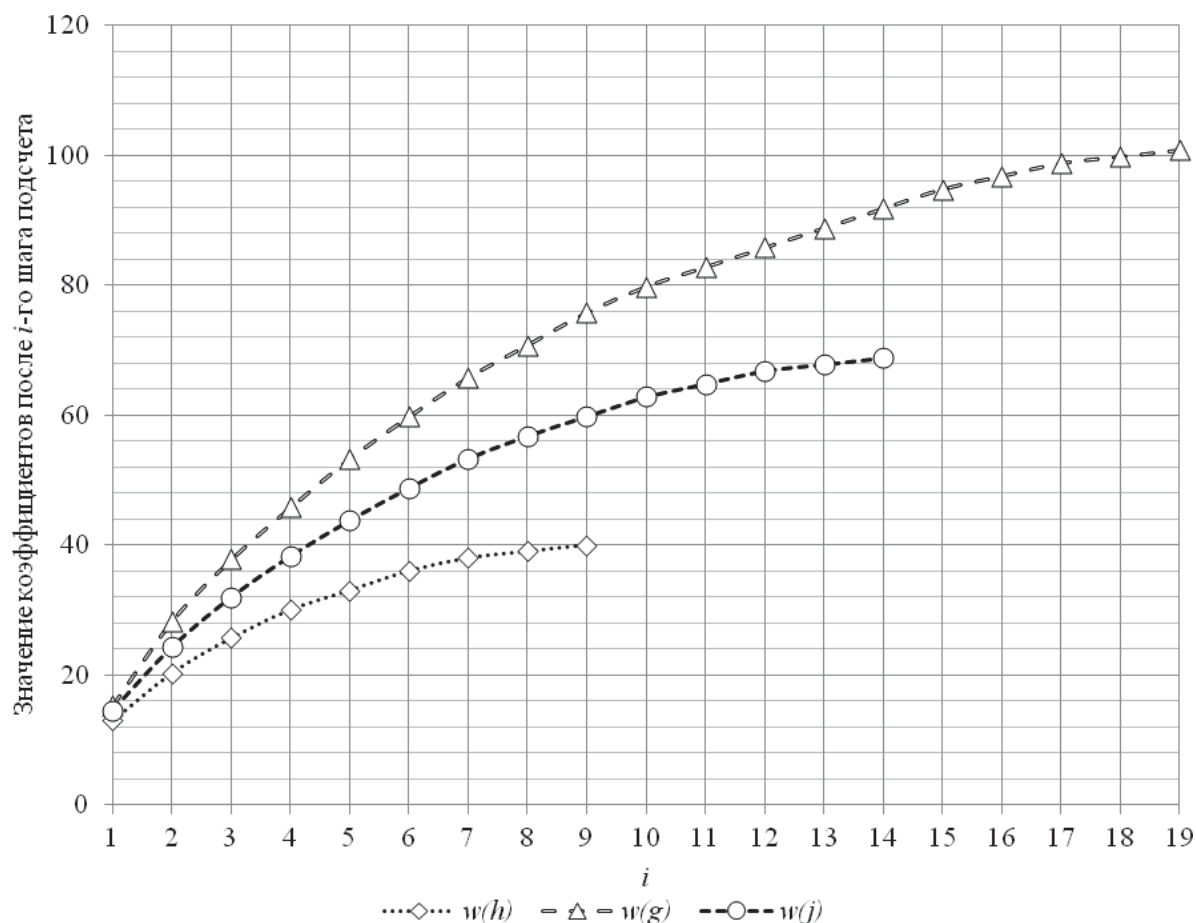


Рис. 7. Рост значений $w(\beta)$ -индексов на каждой итерации подсчета

ставленные закономерности в длинах цепей с каждым из оснований и в значениях $w(\beta)$ -индексов являются общими и присущи подавляющему большинству статистических рядов из цитирований работ реальных ученых.

На определенной итерации итоговое значение суммы изменяется не столь существенно, чем в самом начале. Например, в таблице 7 приведены все итерации подсчета $w(\beta)$ -индексов при $\beta=h, j$ и g . При $k=5$ $w(h)=33,066$ (82,529 % от итогового значения), $w(j)=43,85$ (63,689 % от итогового значения), $w(g)=53,333$ (52,892 % от итогового значения). Останов работы алгоритма подсчета можно инициировать при достижении какого-либо порогового значения доли учитываемых цитирований. Например, 90 % цитирований всех работ. Для рассматриваемого примера 90-процентная граница от общего числа цитирований преодолевается для $w(h)$ при $k=6$, для $w(j)$ при $k=10$, для $w(g)$ при $k=14$.

Введем в рассмотрение «настраиваемые» $w(\beta)$ -индексы.

Обозначим через $w'(\beta)$ -индекс такой индекс, который получается при $k=t$ итерации формирования итоговой суммы.

Обозначим через $w^{-r}(\beta)$ -индекс такой индекс, который не учитывает все работы, цитируемые не более r раз. Например, w^{-1} -индекс не учитывает все цитирования работ, которые процитированы только по одному разу.

Таблица 7. Итерации подсчета $w(\beta)$ -индексов для рассматриваемого примера

k	$w(h)$	$w(j)$	$w(g)$
1	13	14,6	15,333
2	20,333	24,35	28,333
3	25,733	32,017	37,833
4	30,066	38,35	45,833
5	33,066	43,85	53,333
6	36,066	48,85	59,833
7	38,066	53,35	65,833
8	39,066	56,85	70,833
9	40,066	59,85	75,833
10	—	62,85	79,833
11	—	64,85	82,833
12	—	66,85	85,833
13	—	67,85	88,833
14	—	68,85	91,833
15	—	—	94,833
16	—	—	96,833
17	—	—	98,833
18	—	—	99,833
19	—	—	100,833

В таблицах 8 и 9 приведены результаты подсчетов $w^i(\beta)$ и $w^{-r}(\beta)$ -индексов для рассматриваемой выборки при $\beta=h$. В столбцах N , N^i и N^{-r} — общее число цитирований, число цитирований, охваченных $w^i(\beta)$ и $w^{-r}(\beta)$ -индексами. В столбце η приведена доля учитываемых цитирований h -индексом, а в столбцах υ^i и υ^{-r} — доля учитываемых цитирований $w^i(\beta)$ и $w^{-r}(\beta)$ -индексами. Если в среднем h -индекс учитывает только 36,733 % цитирований всех работ ученого для рассматриваемой выборки, то $w^1(h)$ -индекс учитывает в среднем 67,323 % цитирований всех работ. Для $w^5(h)$ -индекса и $w^{10}(h)$ -индекса данный показатель еще выше: получены средние значения в 87,566 % и 92,533 % всех ссылок на работы ученых соответственно. Для $w^{-r}(h)$ -индексов получены такие результаты: w^{-1} -индекс учитывает 98,666 % цитирований всех работ, w^{-2} -индекс — 97,181 %, w^{-3} -индекс — 95,512 %. Это как раз и показывает, что малоцитируемые работы не столь значительно изменяют общую сумму и могут не рассматриваться в конкретных «настройках».

На рисунках 8 и 9 приведены в виде графика доли учитываемых цитирований от общего их числа для $w^i(\beta)$ и $w^{-r}(\beta)$ -индексов.

Таблица 8. $w'(h)$ -индексы со значениями $t = 1, 5, 10$

Позиция при ранжированию по h -индексу	Учел-ный	N	h -ин-декс	η	$w(h)$ -индекс	N^1	N^5	N^{10}	v^1	v^5	v^{10}	w^1 -ин-декс	w^5 -ин-декс	w^{10} -ин-декс
1	A	15246	58	22,065	509,996	12534	14435	14796	82,212	94,681	97,048	216,103	307,032	350,13
2	B	6415	51	40,546	309,878	5337	6025	6181	83,196	93,92	96,352	104,647	160,045	188,712
3	C	4785	45	42,32	352,828	3776	4235	4384	78,913	88,506	91,62	83,911	130,161	158,661
4	D	8093	42	21,797	470,121	5377	7026	7445	66,44	86,816	91,993	128,024	212,338	258,921
5	E	5567	41	30,196	222,192	4578	5463	5531	82,235	98,132	99,353	111,659	173,659	192,192
6	F	2846	38	50,738	214,541	1658	2559	2679	58,257	89,916	94,132	43,632	102,525	127,375
7	G	4332	37	31,602	400,588	2011	3478	3848	46,422	80,286	88,827	54,351	134,627	178,755
8	H	4174	35	29,348	508,633	1541	2669	3145	36,919	63,943	75,347	44,029	116,206	166,166
9	I	1817	35	67,419	126,148	1544	1736	1773	84,975	95,542	97,578	44,114	74,314	88,148
10	J	2320	34	49,828	212,166	1312	2052	2157	56,552	88,448	92,974	38,588	96,166	119,666
11	K	6025	33	18,075	380,547	4848	5561	5730	80,465	92,299	95,104	146,909	203,142	232,714
12	L	3020	33	36,06	302,965	1819	2502	2686	60,232	82,848	88,94	55,121	110,048	141,048
13	M	5284	32	19,379	340,489	3671	4720	4971	69,474	89,326	94,076	114,719	182,092	218,389
14	N	4170	32	24,556	332,622	1438	2944	3560	34,484	70,6	85,372	44,938	125,439	181,494
15	O	1527	32	67,06	88,414	1360	1500	1516	89,064	98,232	99,28	42,5	67,914	77,414
Средние значения				36,733	—	—	—	—	67,323	87,566	92,533	—	—	—

Таблица 9. $w^{-r}(h)$ -индексы со значениями $r = 1, 2, 3$

Позиция при ранжи- ровании по h -индексу	N	h -ин- декс	η	$w(h)$ - индекс	N^{-1}	N^{-2}	N^{-3}	v^{-1}	v^{-2}	v^{-3}	w^{-1} -ин- декс	w^{-2} -ин- декс	w^{-3} -и- ндекс
1	A 15246	58	22,065	509,996	15194	15129	15066	99,659	99,233	98,819	457,996	425,496	404,496
2	B 6415	51	40,546	309,878	6363	6287	6231	99,189	98,005	97,132	257,878	219,878	201,212
3	C 4785	45	42,32	352,828	4712	4592	4482	98,474	95,967	93,668	279,828	219,828	183,161
4	D 8093	42	21,797	470,121	8023	7930	7848	99,135	97,986	96,973	409,121	362,621	335,287
5	E 5567	41	30,196	222,192	5543	5526	5507	99,569	99,264	98,922	198,192	189,692	183,359
6	F 2846	38	50,738	214,541	2806	2769	2695	98,595	97,294	94,694	174,541	156,041	131,375
7	G 4332	37	31,602	400,588	4223	4134	4061	97,484	95,429	93,744	291,588	247,088	222,755
8	H 4174	35	29,348	508,633	4066	3920	3783	97,413	93,915	90,632	400,633	327,633	281,966
9	I 1817	35	67,419	126,148	1785	1764	1736	98,239	97,083	95,542	94,148	83,648	74,314
10	J 2320	34	49,828	212,166	2274	2229	2157	98,017	96,078	92,974	166,166	143,666	119,666
11	K 6025	33	18,075	380,547	5959	5885	5812	98,905	97,676	96,465	314,547	277,547	253,214
12	L 3020	33	36,06	302,965	2955	2859	2776	97,848	94,669	91,921	237,965	189,965	162,298
13	M 5284	32	19,379	340,489	5240	5203	5122	99,167	98,467	96,934	296,489	277,989	250,989
14	N 4170	32	24,556	332,622	4137	4104	4029	99,209	98,417	96,619	299,622	283,122	258,122
15	O 1527	32	67,06	88,414	1513	1500	1491	99,083	98,232	97,642	74,414	67,914	64,914
Средние значения			36,733	—	—	—	—	98,666	97,181	95,512	—	—	—

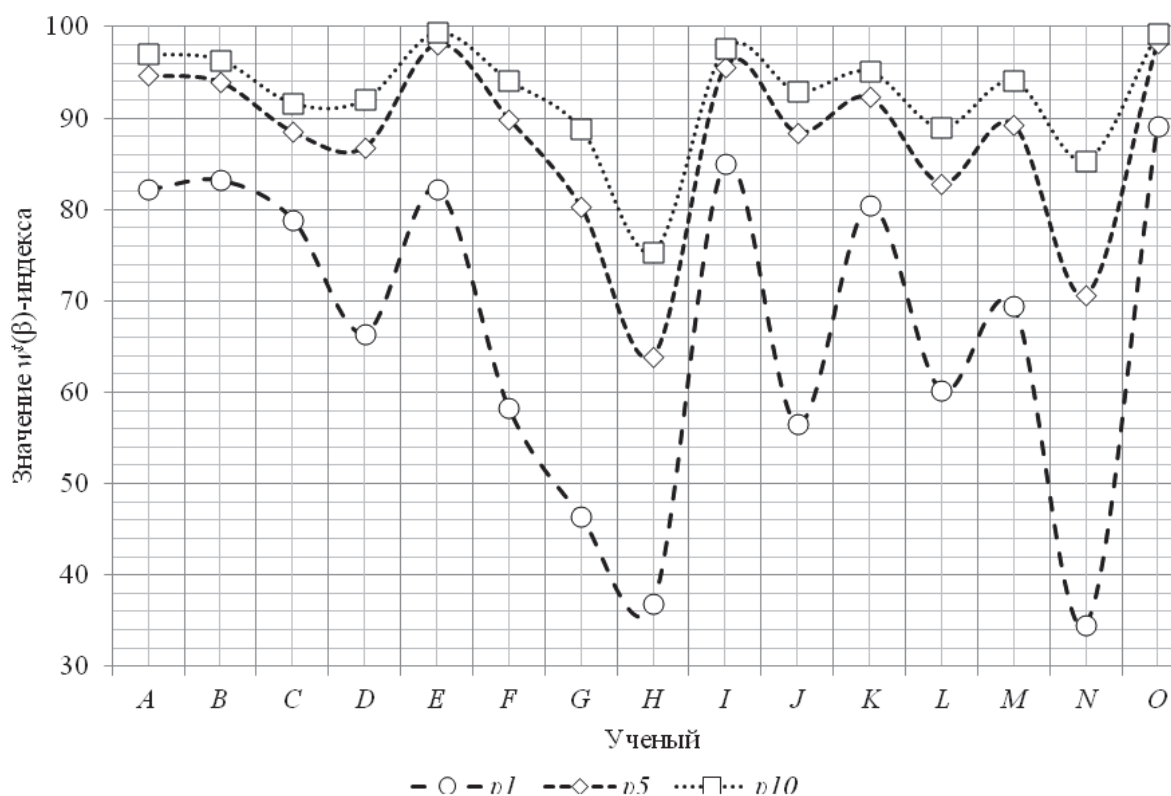


Рис. 8. Доли учитываемых цитирований при использовании $w^1(h)$ -, $w^5(h)$ -, $w^{10}(h)$ -индексов

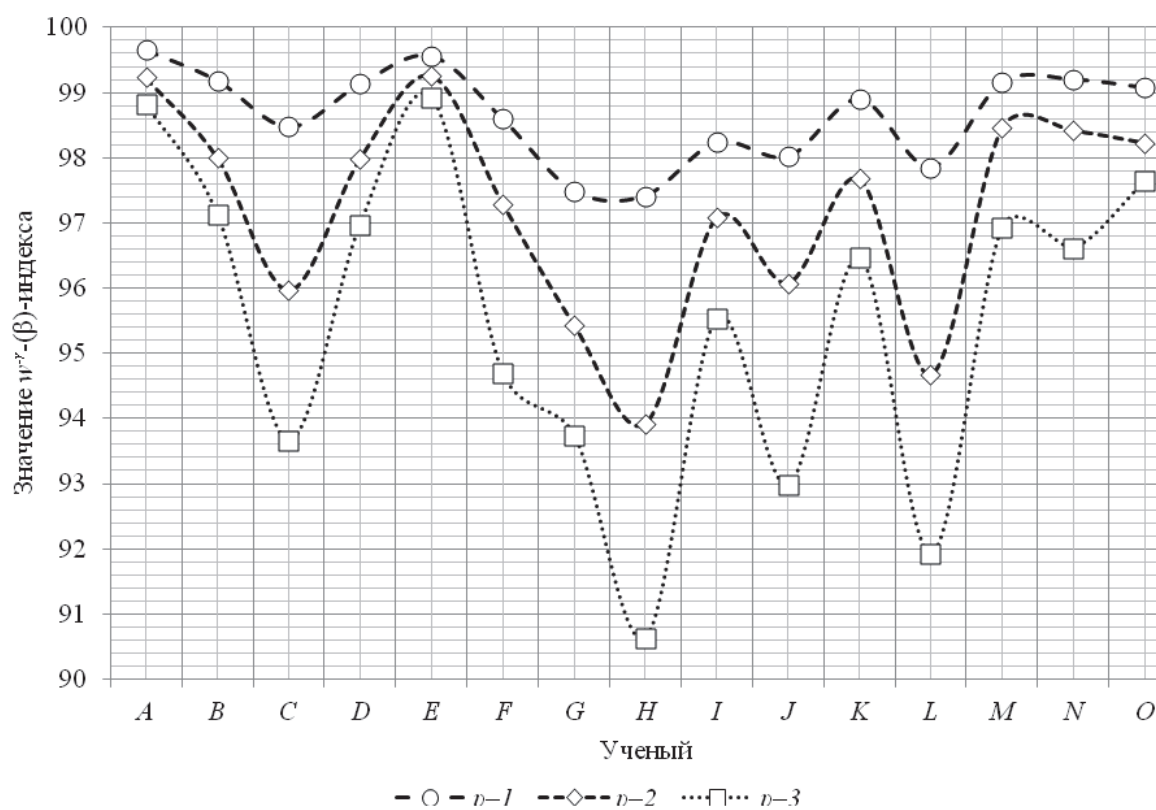


Рис. 9. Доли учитываемых цитирований при использовании $w^1(h)$ -, $w^2(h)$ -, $w^3(h)$ -индексов

2.5. Модификация w -индекса с переменным значением основания

Расчеты показывают, что выбор числа β носит несколько условный характер и не обязательно осуществлять привязку именно к какому-либо известному показателю. Достаточно определить принцип выбора конкретного числа работ из полного множества ранжированных в невозрастающем порядке. Приведем один из таких способов.

Алгоритм 3. Правила подсчета $w(\beta)$ -индекса с переменным основанием:

1. Работы ученого q_i ранжируются в невозрастающем порядке по числу их цитирований N_i .

2. Определяется показатель N_q , характеризующий среднее число цитирований в пересчете на каждую работу:

$$N_q = \frac{N}{Q}, \quad (5)$$

где N — общее число цитирований всех Q работ ученого.

3. Устанавливается значение $i=1$.

4. Для первой в списке работы определяется показатель:

$$\beta_i = \frac{N_1}{N_q}, \quad (6)$$

где запись ... обозначает целое сверху от вычисляемого значения.

5. Определяется суммарное число цитирований β_i работ ученого:

$$s_i = \frac{\sum_{j=1}^{\beta_i} N_j}{\beta_i}. \quad (7)$$

6. Определяется число w^i :

$$w^i = \frac{s_i}{\beta_i}. \quad (8)$$

7. Первые β_i работ ученого удаляются из списка.

8. Проверяется, есть ли в списке хотя бы одна цитируемая работа. Если да, то осуществляется переход к п. 9, если нет — то к п. 10.

9. Вычисляется $i:=i+1$ и осуществляется переход к п. 2.

10. Подсчитывается сумма:

$$w = \sum_{i=1}^k w^i, \quad (9)$$

где k — число итераций формирования чисел β_i .

На этапе вычисления по формуле (5) среднего числа цитирований в пересчете на одну работу определяется число N_q , которое в дальнейшем определяет и значение основания β на соответствующем шаге подсчета. Если имеются работы с большим числом цитирований, резко отличающимся по величине от числа цитирований остальных работ, то по формуле (6) вычисляется большое по величине основание β (далее будет показан такой пример). Это приводит к выделению большого числа работ и усреднения между ними всех цитирований.

Получим число w для заданного в таблице 10 и на рисунке 9 примера. В данном случае нет всплесков числа цитирований (последовательно убывают с шагом в одно цитирование или остаются на том же уровне). Это, однако, не всегда так. Рассмотрим пример, приведенный на рисунке 11 и описанный в таблице 11. В данном случае основания изменяются в зависимости от итерации, что связано с округлением величины β_i по формуле (6). Как итог, на первом шаге итерации существенное число цитирований (107, что составляет примерно 77 % всех цитирований работ) распределяется между первыми девятью работами. Что определяется именно большим числом цитирований (можно сказать, всплеском) первой работы в списке.

Таблица 10. Подсчет $w(\beta)$ -индекса с переменным основанием (первый случай)

k	β_i	s_i	w^i
1	3	46	15,333
2	3	39	13
3	3	27	9
4	2	16	8
5	2	14	7
6	2	12	6
7	2	11	5,5
8	2	10	5
9	2	9	4,5
10	2	7	3,5
11	2	6	3
12	2	6	3
13	2	4	2
14	2	2	1
Сумма		209	85,833

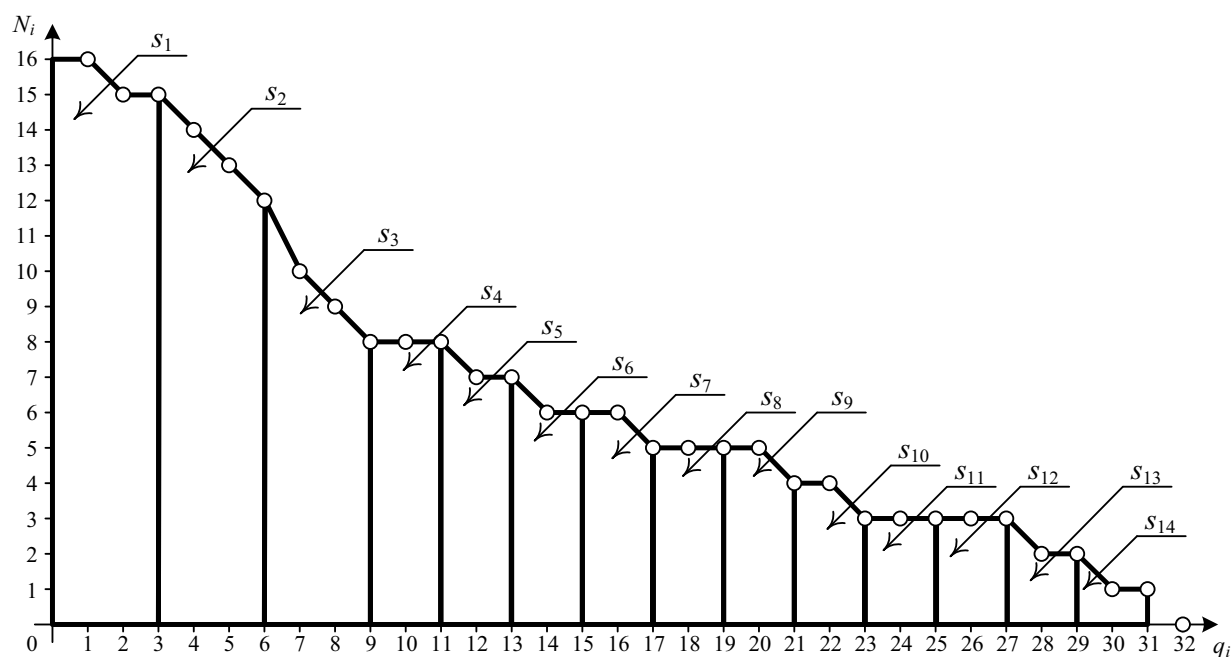


Рис. 10. Геометрическая интерпретация w -индекса с переменным основанием (первый случай)

Таблица 11. Подсчет $w(\beta)$ -индекса с переменным основанием (второй случай)

k	β_i	s_i	w^i
1	9	107	11,889
2	2	6	3
3	3	9	3
4	2	2	1
5	2	5	2,5
6	3	2	0,667
7	2	2	1
8	2	2	1
9	2	2	1
10	3	2	0,667
Сумма		139	25,723

Представленный способ формирования наукометрического показателя более сложный и менее наглядный, чем иные. Тем не менее, можно формировать $w(\beta)$ -индекс с переменным основанием и оценивать эффективность работы ученых именно с помощью такого индекса.

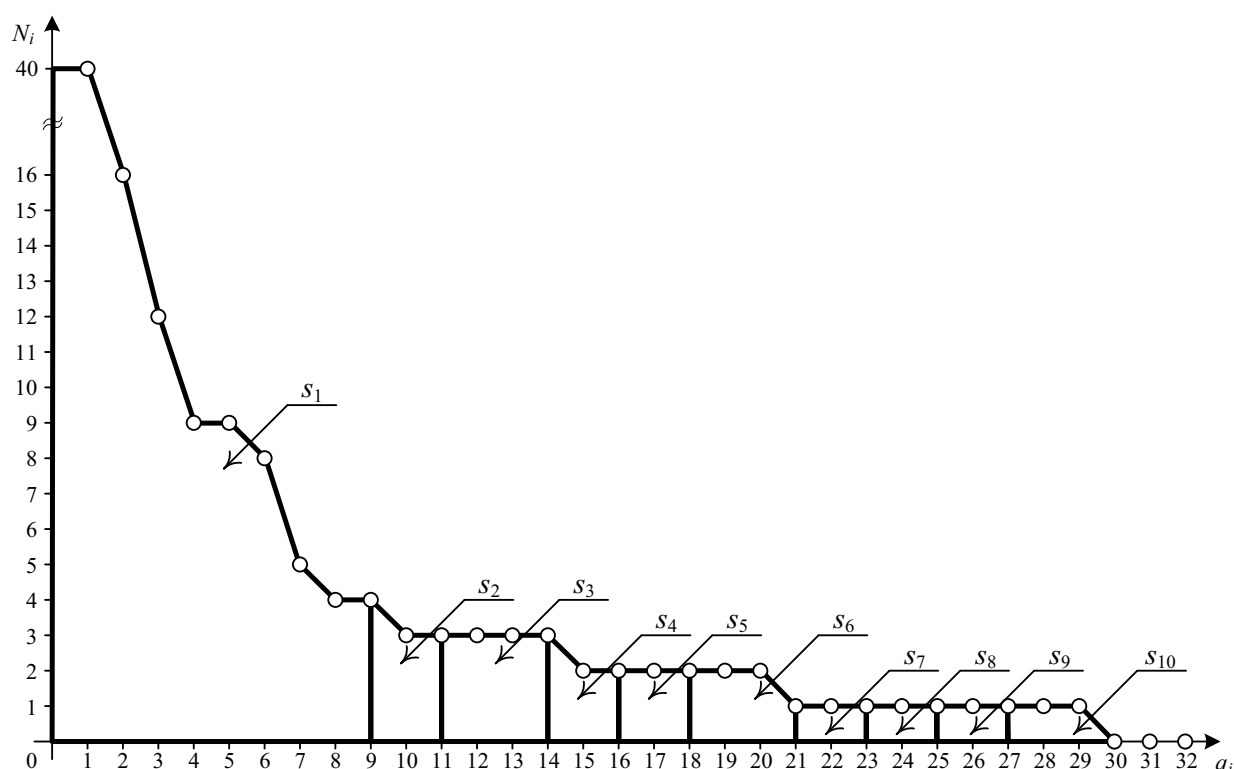


Рис. 11. Геометрическая интерпретация w -индекса с переменным основанием при изменении их значений (второй случай)

Заключение

Широкое использование наукометрических показателей, основанных на цитируемости работ ученых, обусловлено простотой их подсчета и интерпретации. Однако большинство этих показателей учитывает только одну какую-нибудь особенность цитируемых работ и, как правило, выделяет наиболее значимые работы среди всего их многообразия. Существуют, конечно, и показатели, учитывающие полное множество цитирований всех работ ученого, но они тоже несовершенны и не принимают во внимание особенности распределения цитируемости.

Предложенные в статье способы формирования нового наукометрического показателя, основанного на цитируемости работ ученого, позволяют более точно оценивать его вклад в развитие соответствующей предметной области. Есть возможность настройки показателя с учетом специфики предметной области. В относительно узких областях науки, например, автоматики и вычислительной техники (где количество ученых существенно ниже, чем в таких областях, как биология и физика), существенным является число малоцитируемых работ. А в более широких областях малоцитируемые работы могут вообще не рассматриваться, поскольку весомого вклада не дают. Итерационный принцип подсчета индекса цитируемости позволяет учесть все эти особенности для различных областей науки.

Несомненное достоинство w -индекса и его модификаций в том, что он представляет собой единственное число и имеет вполне понятную и простую геометрическую интерпретацию. Недостатком является более сильное влияние малоцитируемых работ на общее значение показателя, чем высокоцитируемых. Но, как показывают исследования, w -индекс и его модификации более точно учитывают вклад ученого в свою предметную область, чем известные h -, j - и g -индексы, ориентированные на высокоцитируемые и наиболее популярные работы ученых. При этом частично решается проблема «накрутки» показателей, т. к. усреднение значений при итерационном подсчете позволяет учесть «аномальные» перепады в числе цитируемостей, прослеживающиеся при явных «накрутках», самоцитировании и цитировании соавторами. К сожалению, полностью проблему «накрутки» предложенные показатели не решают.

Принципы формирования w -индекса и его различных модификаций могут быть использованы и совместно с иными способами оценки деятельности ученых, такими как учет соавторов, уровень периодического издания и пр.

Новый принцип формирования наукометрического показателя, основанного на учете цитируемости работ ученого, позволяет дополнить известные показатели и в некотором смысле даже заменить их.

Библиографический список

1. Ball P. Index Aims for Fair Ranking of Scientists//Nature. – 2005. – Vol. 436. – P. 900. – doi.org/10.1038/436900a.
2. Hirsch J. E. An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output//Proceedings of National Academy of Sciences of the USA. – 2005. – Vol. 102. – Issue 46. – Pp. 16569–16572. – DOI: 10.1073/pnas.0507655102.
3. Jones T., Huggett S., Kamalski J. Finding a Way through the Scientific Literature: Indexes and Measures//World Neurosurgery. – 2011. – Vol. 76. – Issue 1–2. – Pp. 36–38. – doi.org/10.1016/j.wneu.2011.01.015.
4. Михайлов О. В. Цитирование и цитируемость в науке. – М.: ЛЕНАНД. – 2017. – 208 с.
5. Орлов А. И. Число цитирований – ключевой показатель результативности в фундаментальной науке//Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Институт научной информации по общественным наукам Российской академии наук. 2018. С. 861–867.
6. Михайлов О. В. О возможной модификации индексов Хирша и Эгга с учетом соавторства//Социология науки и технологий. – 2014. – Т. 5. – № 3. – С. 48–56.
7. Марвин С. В. Альтернативная дробная модификация индекса Хирша, учитывающая количество авторов цитируемых статей//Управление большими системами. – 2015. – № 56. – С. 108–122.
8. Марвин С. В. Нормированная доленая цитируемость как универсальная характеристика научной публикации//Социология науки и технологий. – 2016. – № 1. – С. 95–108.
9. Raheel M., Ayaz S., Afzal M. T. Evaluation of h-index, its variants and extensions based on publication age & citation intensity in civil engineering//Scientometrics. – 2018. – Vol. 114. – Issue 3. – Pp. 1107–1127. – DOI: 10.1007/s11192-017-2633-2.
10. Leydesdorff L., Bornmann L., Opthof T. h_x : the Scientist as Chimpanzee or Bonobo//Scientometrics. – 2019. – Vol. 118. – Pp. 1163–1166. – DOI: 10.1007/s11192-018-2994-1.

11. Hirsch J. E. An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output That Takes into Account the Effect of Multiple Coauthorship//*Scientometrics*. – 2010. – Vol. 85. – Issue 3. – Pp. 741–754. – DOI: 10.1007/s11192-010-0193-9.
12. Цыганов А. В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости//*Управление большими системами*. – 2013. – № 44. – С. 248–261.
13. Штовба С. Д., Штовба Е. В. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого//*Управление большими системами*. – 2013. – № 44. – С. 262–278.
14. Ramana K. V., Kandi S. A Newer Approach to Assessing a Researcher's Scientific Impact: Ramana's Researcher Index (r-Index)//*Biomedicine and Biotechnology*. – 2013. – Vol. 1. – Issue 2. – Pp. 9–10. – DOI: 10.12691/bb-1-2-2.
15. Полянин А. Д. Недостатки индексов цитируемости и Хирша и использование других наукометрических показателей//*Математическое моделирование и численные методы*. – 2014. – № 1. – С. 131–144.
16. Михайлов О. В. Парадоксы цитирования//*Вестник Российской академии наук*. – 2018. – Т. 88. – № 3. – С. 268–271.
17. Hirsch J. E. An Index to Quantify an Individual's Scientific Leadership//*Scientometrics*. – 2019. – Vol. 118. – Issue 1. – Pp. 673–686. – DOI: 10.1007/s11192-018-2994-1.
18. Hauer M. P., Hofmann X. C. R., Krafft T. D., Zweig K. A. Quantitative analysis of automatic performance evaluation systems based on the h-index//*Scientometrics* (2020) 123:735–751. DOI: 10.1007/s11192-020-03407-7.
19. Герасименко П. В. Моделирование показателей результатов творческой деятельности ученого по его публикациям и их цитированиям//*Автоматика на транспорте*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 505–514. – DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-4-493-504.
20. Герасименко П. В. Модификации индекса Хирша для дифференцированной оценки результатов творческой деятельности ученых//*Управление наукой и наукометрия*. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 55–71.
21. Egghe L. Theory and Practice of the g-Index//*Scientometrics*. – 2006. – Vol. 69. – Pp. 131–152.
22. Михайлов О. В. Новая версия индекса Хирша – j-индекс//*Вестник Российской Академии наук*. – 2014. – Т. 84. – № 6. – С. 532–535. – DOI: 10.7868/S0869587314060085.
23. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. «Настраиваемый» индекс оценки деятельности ученого//*Социология науки и технологий*. – 2020. – Т. 11. – № 2. – С. 194–210. – DOI: 10.24411/2079-0910-2020-12009.
24. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Новый подход к расчету показателей деятельности ученых//*Автоматика на транспорте*. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 505–514. – DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-4-505-514.
25. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Обобщенный индекс цитирования//*Автоматика, связь, информатика*. – 2020. – № 8. – С. 42–45.

Valery V. Sapozhnikov, D. Sc.

Vladimir V. Sapozhnikov, D. Sc.

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

Dmitry V. Efanov, D. Sc.

*LLC STC "Integrated Monitoring Systems", St. Petersburg
Graduate School of Transport,
Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
Department "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport",
Russian University of Transport, Moscow*

ITERATIVE METHODS OF SCIENTIFIC INDICATORS FORMATION WITH CONSIDERATION TO THE FULL SET OF CITED WORKS

The widely known scientometric indicators based on the number of citations of the scientist's works are analyzed. Some methods of forming a new scientometric indicator are proposed, taking into account the full set of citations of the scientist's works. These methods have a simple and understandable geometric interpretation and give the values of indicators in the form of a single number, which is convenient from the standpoint of comparing indicators of different scientists and forming ratings.

The efficiency of the use of the iterative principle of the citation index formation is demonstrated with a certain number of the first works in the list of the scientist's works ranked in the non-increasing order of the number of citations, the averaging of the number of citations, the exclusion of these works from consideration and the repetition of all procedures with a given method of highlighting the first works at each iteration step are distinguished. The method of selecting the first works from the list allows you to select the base of the chain of intermediate indicators.

In the work of the authors, it is proposed as a basis to take the Hirsch index at each iteration step (to select the Hirsch base) and build a chain of decreasing indices with averaging the number of citations at each iteration. This approach makes it possible to more fully take into account the scientist's contribution to the development of the corresponding subject area. Another number can be chosen as the basis, for example, the determination of the Egge or Mikhailov index can be carried out. The basis can also be variable – such cases are considered in the article.

The calculations presented in the article are supplemented by experimental results obtained using statistical information from the Russian Science Citation Index database. The proposed iterative method for the formation of the citation index allows the "adjustment" of the index and, if necessary, and lets not take into account low-cited works or take into account only a certain percentage of citations from their total number. This may be relevant for specific subject areas of science and scientific or educational organizations.

Assessment of the activities of scientists; scientometric indicators; accounting for the number of citations; Hirsch index; Egge index; Mikhailov index

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-137-166

References

1. Ball P. (2005) Index Aims for Fair Ranking of Scientists. *Nature*, vol. 436, p. 900.
2. Hirsch J. E. (2005) An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output. *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*, vol. 102, iss. 46, pp. 16569–16572.

3. Jones T., Huggett S., Kamalski J. (2011) Finding a Way through the Scientific Literature: Indexes and Measures. *World Neurosurgery*, vol. 76, iss. 1–2, pp. 36–38.
4. Mikhaylov O. V. (2017) *Tsitirovaniye i tsitiruyemost' v nauke*. [Citation and citation rate in science]. Moscow, LENAND Publ., 208 p. (In Russian)
5. Orlov A. I. (2018) Chislo tsitirovaniy – klyuchevoy pokazatel' rezul'tativnosti v fundamental'noy nauke [The number of citations is a key performance indicator in fundamental science]. *Rossiia: tendentsii i perspektivy razvitiya. Yezhegodnik. Institut nauchnoy informatsii po obshchestvennym naukam Rossiyskoy akademii nauk*. [Russia: Trends and Development Prospects. Yearbook. Institute for Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences], pp. 861–867. (In Russian)
6. Mikhaylov O. V. (2014) O vozmozhnoy modifikatsii indeksov Khirsha i Egga s uchetom soavtorstva [On a possible modification of the Hirsch and Egg indexes taking into account co-authorship]. *Sotsiologiya nauki i tekhnologii*. [Sociology of Science and Technology], vol. 5, no. 3, pp. 48–56. (In Russian)
7. Marvin S. V. (2015) Al'ternativnaya drobnaya modifikatsiya indeksa Khirsha, uchityvayushchaya kolichestvo avtorov tsitiruyemykh statey [Alternative fractional modification of the Hirsch index taking into account the number of authors of the cited articles]. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], no. 56, pp. 108–122. (In Russian)
8. Marvin S. V. (2016) Normirovannaya dolevaya tsitiruyemost' kak universal'naya kharakteristika nauchnoy publikatsii [Normalized fractional citation as a universal characteristic of a scientific publication]. *Sotsiologiya nauki i tekhnologii*. [Sociology of Science and Technology], no. 1, pp. 95–108. (In Russian)
9. Raheel M., Ayaz S., Afzal M. T. (2018) Evaluation of h-index, its variants and extensions based on publication age & citation intensity in civil engineering. *Scientometrics*, vol. 114, iss. 3, pp. 1107–1127.
10. Leydesdorff L., Bornmann L., Opthof T. (2019) ha: the Scientist as Chimpanzee or Bonobo. *Scientometrics*, vol. 118, pp. 1163–1166.
11. Hirsch J. E. (2010) An Index to Quantify an Individual's Scientific Research Output That Takes into Account the Effect of Multiple Coauthorship. *Scientometrics*, vol. 85, iss 3, pp. 741–754.
12. Tsyganov A. V. (2013) Kratkoye opisaniye naukometricheskikh pokazateley, osnovannykh na tsitiruyemosti [Brief description of scientometric indicators based on citation]. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], no. 44, pp. 248–261. (In Russian)
13. Shtovba S. D., Shtovba Ye. V. (2013) Obzor naukometricheskikh pokazateley dlya otsenki publikatsionnoy deyatel'nosti uchenogo [Review of scientometric indicators for assessing the publication activity of a scientist]. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], no. 44, pp. 262–278 (In Russian)
14. Ramana K. V., Kandi S. A. (2013) Newer Approach to Assessing a Researcher's Scientific Impact: Ramana's Researcher Index (r-Index). *Biomedicine and Biotechnology*, vol. 1, iss. 2, pp. 9–10.
15. Polyanin A. D. (2014) Nedostatki indeksov tsitiruyemosti i Khirsha i ispol'zovaniye drugikh naukometricheskikh pokazateley [Disadvantages of both citation indices and Hirsch and the use of other scientometric indicators]. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], no. 1, pp. 131–144. (In Russian)
16. Mikhaylov O. V. (2018) Paradoksy tsitirovaniya [Paradoxes of citation]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], vol. 88, no. 3, pp. 268–271. (In Russian)
17. Hirsch J. E. (2019) An Index to Quantify an Individual's Scientific Leadership. *Scientometrics*, vol. 118, iss. 1, pp. 673–686.

18. Hauer M. P., Hofmann X. C. R., Krafft T. D., Zweig K. A. (2020) Quantitative analysis of automatic performance evaluation systems based on the h-index. *Scientometrics*, 123:735–751.
19. Gerasimenko P. V. (2019) Modelirovaniye pokazateley rezul'tatov tvorcheskoy deyatel'nosti uchenogo po yego publikatsiyam i ikh tsitirovaniyam [Modeling of indicators of the results of a scientist's creative activity based on his publications and their citations]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 5, no. 4, pp. 505–514. (In Russian)
20. Gerasimenko P. V. (2020) Modifikatsii indeksa Khirsha dlya differentsirovannoy otsenki rezul'tatov tvorcheskoy deyatel'nosti uchenykh [Modifications of the Hirsch index for a differentiated assessment of the results of the creative activity of scientists]. *Upravleniye naukoj i naukometriya* [Science management and scientometrics], vol. 15, no. 1, pp. 55–71. (In Russian)
21. Egghe L. (2006) Theory and Practice of the g-Index. *Scientometrics*, vol. 69, pp. 131–152.
22. Mikhaylov O. V. (2014) Novaya versiya indeksa Khirsha – j-indeks [New version of the Hirsch index – j-index]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], vol. 84, no. 6, pp. 532–535. (In Russian)
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Yefanov D. V. (2020) «Nastraivayemyy» indeks otsenki deyatel'nosti uchenogo [“Customizable” index for assessing the activities of a scientist]. *Sotsiologiya nauki i tekhnologii*. [Sociology of Science and Technology], vol. 11, no. 2, pp. 194–210. (In Russian)
24. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Yefanov D. V. (2019) Novyy podkhod k raschetu pokazateley deyatel'nosti uchenykh [A new approach to calculating the performance indicators of scientists]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 5, no. 4, pp. 505–514. (In Russian)
25. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Yefanov D. V. (2020) Obobshchennyy indeks tsitirovaniya [Generalized citation index]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], no. 8, pp. 42–45. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии С. А. Никищенковым
Поступила в редакцию 05.12.2020, принята к публикации 23.12.2020*

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: port.at.pgups1@gmail.com

САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: sapozhnikov-at@yandex.ru

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович — д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», профессор Высшей школы транспорта Ин-

ститута машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

© Сапожников Вал. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В., 2021

Подписано в печать с оригинал-макета 31.03.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 21. Уч.-изд. л. 10,5.
Установочный тираж 300 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.