



# АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

---

# AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 1 • Том 6

Март, 2020

---

March, 2020



## 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

Л. А. Карпичева,  
генеральный директор ООО «ИД Т-ПРЕССА»

## 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 РЕДАКЦИИ

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

Научный редактор —  
д-р техн. наук, доцент *Д. В. Ефанов*  
Переводчики — *Ю. А. Фаттахова, А. Н. Крышня*  
Литературный редактор  
и корректор — *Е. Г. Локтионова*  
Выпускающий редактор — *В. Е. Филиппова*  
Верстка — *Н. В. Стасевой*

Электронное сопровождение — *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

## 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

Liudmila A. Karpicheva, CEO  
«ID T-PRESS» LLC

## 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

## ADDRESS

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

Science editor, D. Sc., Associate Professor  
*Dmitry V. Efanov*  
English translation *Yulia A. Fattakhova,*  
*Anna N. Kryshnia*  
Editing and proofreading *Eugenia G. Loktionova*  
Executive editor *Viktoria E. Philippova*  
Layout *Nadezda V. Staseeva*

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2020

## 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 технических наук, профессор,  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники,  
Харьков, Украина

*Фуниан Ху*

д-р наук, профессор,  
Школа электротехники педагогического  
университета Цзянсу,  
Суйчжоу, 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

*Никищенко 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 Khristov*

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

### ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ

*В. А. Володарский*

Оптимизация технического содержания устройств  
железнодорожной автоматики и телемеханики  
при неопределенности исходной информации . . . . . 7

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

*Ю. В. Алевтдинова*

Система технического диагностирования металлоконструкции  
подвижной единицы . . . . . 25

### ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Т. А. Искаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо*

Подходы к оценке качества планирования и управления движением  
пассажирских поездов метрополитена. . . . . 38

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

*Р. Б. Абдуллаев*

Вероятностные характеристики полиномиальных кодов  
в системах технического диагностирования . . . . . 64

### ИЗ ИСТОРИИ АВТОМАТИКИ

*Г. К. Зальцман, А. П. Пронин*

Из истории звуковой сигнализации на железнодорожном транспорте . . . . . 89

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

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

Журналу «Автоматика на транспорте» пять лет . . . . . 104

## CONTENTS

### VITALITY, RELIABILITY, SAFETY

*V. A. Volodarsky*

Optimization of technical maintenance of automation  
and remote control devices with source data uncertainty . . . . . 7

### MONITORING METHODS IN TRANSPORT

*Yu. V. Alevetdinova*

Technical diagnostics system of rolling stock unit metalwork . . . . . 25

### ELECTRONIC SIMULATION

*T. A. Iskhakov, A. I. Safronov, V. G. Sidorenko, M. A. Chzho*

Approaches to quality assessment  
of subway traffic planning and management . . . . . 38

### TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

*R. B. Abdullaev*

Probabilistic Features of Polynomial Codes  
in Technical Diagnosis Systems . . . . . 64

### HISTORY OF AUTOMATION

*G. K. Zal'tsman, A. P. Pronin*

A historical introduction to the sound signaling on railway transport. . . . . 89

### BRIEF REPORTS

*V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*

The journal "Automation on Transport" celebrates its 5<sup>th</sup> anniversary . . . . . 104

УДК 621.3.019

**В. А. Володарский, канд. техн. наук**

*Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»,  
Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Исходная информация, которую реально удается собрать и подготовить для оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, оказывается, как правило, в значительной степени неопределенной. Она проявляется в недостоверном знании численных значений исходных показателей или их вероятностного описания. Поэтому становится очевидным, что методы оптимизационных расчетов при полностью определенной информации все в большей мере приходят в противоречие с реальной действительностью.

В статье рассматривается методологический подход к постановке и решению задачи по оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях неопределенности исходной информации. В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации технического содержания целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимое по условиям обеспечения безопасности значение вероятности безотказной работы железнодорожной автоматики и телемеханики. Целью формализованного решения вероятностно-неопределенных задач технического содержания является определение зоны условно оптимальных значений периодичностей, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен производиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Учет факторов неопределенности при принятии решений о параметрах технического содержания имеет ряд преимуществ. Первое из них — это наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Второе — обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа на их основе последствий принятых решений. Третье — свобода выбора наиболее гибких решений из числа практически равнозначных. И, наконец, четвертое — возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

железнодорожная автоматика и телемеханика, техническое содержание, оптимизация, периодичность, информация, неопределенность

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-7-24

### **Введение**

Под техническим содержанием (ТС) согласно [1] будем понимать совокупность мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособного состояния техники и ее ресурса. В частном случае ТС может сводиться к предупредительным заменам (ПЗ) и предупредительным ремонтам (ПР).

При разработке рациональной системы технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) следует учитывать некоторые предпосылки. В интересах максимального повышения эффективности работы железнодорожного транспорта заданный объем перевозок необходимо выполнять с минимальными затратами. Значит, нужно стремиться к сокращению эксплуатационных затрат, связанных с содержанием устройств ЖАТ. Выделим две основные группы этих затрат. Первая определяется расходами материальных и трудовых ресурсов на содержание, а вторая связана с аварийным восстановлением устройств ЖАТ и ущербом от задержек поездов.

Вопросы оптимального планирования технического содержания устройств ЖАТ рассматривались в ряде научных работ [2–7]. При этом расчеты оптимальной периодичности ТС устройств ЖАТ проводятся, как правило, в предположении о полной достоверности и однозначности используемой исходной информации и, следовательно, об однозначности получаемых решений. Недостатком такого подхода становится заведомое преувеличение точности оптимизации и невозможность выявить решения, экономически близкие к однозначно определяемому формально оптимальному решению.

Общие вопросы технического содержания устройств подробно описаны в ряде монографий [8–13]. Отдельные вопросы автор рассматривал в [14–16].

На практике исходная информация, которую реально удается собрать и подготовить для оптимизации периодичности ТС устройств ЖАТ, оказывается, как правило, в значительной степени неопределенной. Она проявляется в недостоверном знании численных значений исходных показателей или их вероятностного описания. Поэтому становится очевидным, что методы оптимизационных расчетов при полностью определенной информации все в большей мере приходят в противоречие с реальной действительностью. Объективно существующая неопределенность исходной информации требует принципиально нового подхода к постановке и решению задачи. Оптимизация в условиях неопределенности неизбежно содержит эвристические процедуры, исключающие полную формализацию этого процесса. При этом речь идет не о технических, а именно о принципиальных трудностях формализации, вызванных неполным знанием.

**Цель статьи** — изложить один из возможных методических подходов к постановке и решению задачи по оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях неопределенности исходной информации.

## 1. Постановка задачи

Особого внимания в условиях неопределенности требует сама постановка задачи, которая состоит:

1) в описании технико-экономической сущности задачи, целей и критериев оптимизации;

2) в математической формализации задачи, включающей определение целевой функции, ограничений и состава параметров, неопределенность которых может повлиять на результаты решения.

Оптимизация заключается в установлении таких значений параметров ПЗ и ПР, при которых обеспечивается максимально возможный в определенных условиях эффект. Под эффектом здесь понимается полное или частичное достижение целей. Выделим наиболее существенные цели и соответствующие им критерии. Очевидно, что система ПЗ и ПР не может считаться совершенной, если экономически она недостаточно эффективна. Поэтому основным критерием оптимизации будет минимум удельных эксплуатационных затрат на ПЗ и ПР и аварийное восстановление с учетом ущерба от возможных отказов устройств ЖАТ. В отдельных случаях отказы ЖАТ могут приводить к нарушениям безопасности движения поездов. Поэтому вторым критерием при определении параметров ПЗ и ПР следует считать обеспечение безопасности движения при эксплуатации устройств ЖАТ.

При оптимизации ПЗ и ПР невозможно рассматривать экономическую эффективность и безопасность в отрыве от надежности. Следует подчеркнуть, что применительно к ЖАТ надежность приобретает как бы двойную значимость. С одной стороны, она существенно влияет на экономическую эффективность, с другой — в значительной мере предопределяет безопасность. В рамках комплексного подхода рационально считать, что основными являются критерии экономической эффективности и безопасности, а надежность — средство, с помощью которого достигаются требуемые значения этих показателей. Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти такие значения параметров ПЗ и ПР, при которых достигается минимум удельных эксплуатационных затрат и обеспечивается допустимый по условиям безопасности уровень надежности ЖАТ.

Очевидно, что проведение ПЗ и ПР целесообразно только для «стареющих» устройств ЖАТ, интенсивность отказов которых со временем возрастает. Поэтому все отказы ЖАТ нужно разделить на два вида:

1) внезапные отказы, которые не зависят от внутреннего состояния устройств, а вызваны внешними факторами (например, пробой изоляции при грозовых разрядах, повреждения при сильном ветре, гололеде и т. п.). Интенсивность таких отказов в процессе эксплуатации остается постоянной, и они не могут быть устранены ПЗ и ПР;

2) постепенные отказы, интенсивность которых со временем эксплуатации возрастает, и они могут быть устранены ПЗ и ПР. Их вызывает старение или износ устройств (например, постепенное снижение сопротивления изоляции кабельных линий).

При техническом содержании необходимо учитывать возможность восстановления надежности устройств ЖАТ. Рассмотрим три степени восстановления надежности после проведения ПЗ и ПР или после устранения отказов устройств на примере изменения интенсивности постепенных отказов  $\lambda(t)$  от времени эксплуатации  $t$  (рис. 1 и 2):

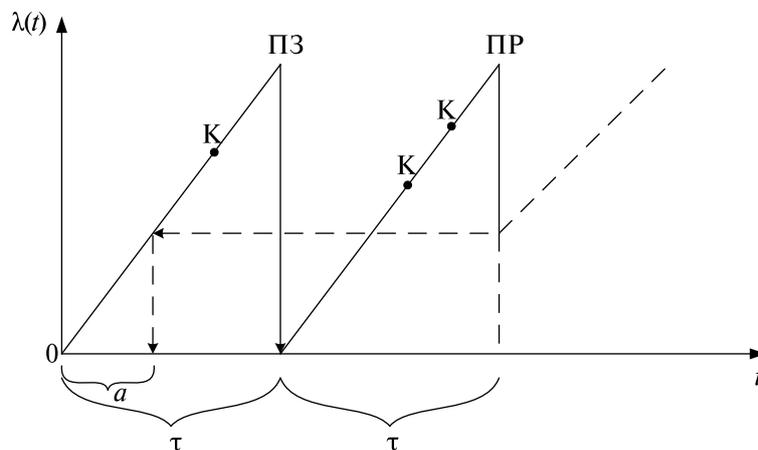
1) никакого обновления;

- 2) частичное обновление;
- 3) полное обновление.

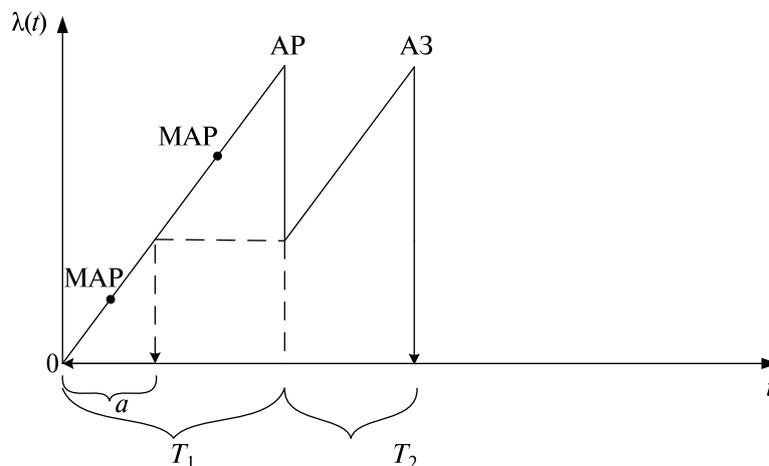
Профилактические работы типа осмотров, проверок, контроля и испытаний не приводят к обновлению устройств ЖАТ, и интенсивность их отказов не изменяется (см. точки  $K$  на рис. 1). Если устранение отказа проводится минимальным аварийным ремонтом (МАР) (например, замена предохранителя, закрепление контакта и др.), то никакого обновления устройств не проводится, и интенсивность их отказов не изменяется (см. точки МАР на рис. 2). Вероятность таких событий определяется как

$$\bar{q} = n_m/n,$$

где  $n_m$  — количество отказов, устраняемых МАР;  $n$  — общее количество отказов. Вероятность того, что отказ будет устранен аварийным ремонтом (АР) или аварийной заменой (АЗ), определяется как  $q = 1 - \bar{q}$ .



**Рис. 1.** Изменение интенсивности постепенных отказов при ПЗ и ПР



**Рис. 2.** Изменение интенсивности постепенных отказов при их устранении

Частичное восстановление происходит при проведении предупредительного ремонта (ПР) с периодичностью  $\tau$  или аварийного ремонта (АР) через наработку на отказ  $T_j$ . В этом случае «возраст» устройств как бы «возвращается» в точку  $a$  (см. рис. 1 и 2). «Время жизни» устройств ЖАТ от 0 до  $a$  назовем глубиной восстановления надежности при предупредительном или аварийном ремонте. Полное восстановление происходит при предупредительной или аварийной замене устройств. При этом «возраст» устройств ЖАТ как бы «возвращается» в точку 0 (см. рис. 1 и 2).

С точки зрения математической формализации и общих подходов к решению задача оптимизации ПЗ и ПР относится к классу задач исследования операций. Она сводится к нахождению таких значений управляемых параметров  $U$ , при которых в условиях воздействия неуправляемых  $Z$  и фиксированных  $W$  параметров целевая функция  $C(U, Z, W)$ , определяющая удельные эксплуатационные затраты, принимает минимальное значение. В качестве управляемых параметров  $U$  выступает периодичность  $\tau$  и глубина  $\alpha$  ПЗ или ПР устройств. Фиксированными параметрами  $W$  являются стоимость ПЗ или ПР  $B$  и стоимость аварийного восстановления с учетом ущерба из-за отказов  $A$ . В качестве неуправляемых параметров  $Z$  выступают вероятность безотказной работы  $P$  и вероятность  $q$  того, что отказ ЖАТ будет устранен минимально необходимым аварийным ремонтом.

На параметры целевой функции могут быть наложены ограничения в виде равенств и неравенств. Вероятность безотказной работы (ВБР), определяющая состояние устройств ЖАТ, зависит от параметров  $\tau$  и  $\alpha$  и описывается функцией распределения  $F$ . По условиям обеспечения безопасности значение ВБР должно быть не ниже определенного допустимого значения  $P_d$ . Поскольку ПЗ и ПР направлены на предупреждение отказов ЖАТ, периодичность их должна быть меньше наработки на отказ  $T$ . Тогда в общем виде задача оптимизации ПЗ и ПР устройств ЖАТ может быть формализована следующим образом:

$$C(\tau, \alpha) = \min C(\tau, \alpha; A, B; P, q) \text{ при } P = F(\tau, \alpha), \alpha \geq 0, 0 < \tau < T, P \geq P_d. \quad (1)$$

Введем понятия  $C$  (критерий, по которому определяются оптимальные параметры ПЗ и ПР из условия минимума удельных эксплуатационных затрат) и  $P$  (критерий, по которому определяются параметры ПЗ и ПР из условия обеспечения допустимой по безопасности ВБР). На практике при проведении ПЗ и ПР возникает ряд ограничений материальных ресурсов, численности персонала, длительности проведения, погодных условий и т. п. Сроки ПЗ и ПР различных устройств ЖАТ должны быть увязаны между собой. В рамках  $C$ - и  $P$ -критериев трудно, а иногда и невозможно учесть влияние множества ограничений и факторов, ряд которых может быть задан лишь в качественной форме и не влияет на поиск оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Поэтому представляется целесообразным такие ограничения не формализовать, а учитывать их при принятии окончательных решений.

Если для параметров целевой функции  $Z$ ,  $W$  и функции распределения  $F$  имеются однозначные статистические характеристики, то решаемая оптимизационная задача (1) будет вероятностно-определенной. Если для  $Z$  и  $W$  имеются только данные об их возможных диапазонах, а  $F$  может быть задана серией возможных функций распределения, то задачу (1) необходимо решать в вероятностно-неопределенной постановке. Таким образом, математические принципы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности исходной информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Поэтому применению формализованных методов оптимизации должен предшествовать анализ исходной информации, неопределенность которой влияет на результаты решения задачи.

## 2. Анализ факторов неопределенности

Задачей анализа является классификация и качественное описание факторов неопределенности для того, чтобы выяснить возникающие при оптимизации методические и практические трудности решения и наметить пути их преодоления, а также установить в дальнейшем степень влияния этих факторов на точность оптимизации ПЗ и ПР устройств ЖАТ. Точность оптимизации можно оценить по отклонениям целевой функции от оптимального значения под действием интересующего нас параметра в виде коэффициента  $K = C/C_0$ , где  $C$  — значение целевой функции при отклонении параметра;  $C_0$  — значение целевой функции при оптимальном значении параметра.

Используя классификацию [17], исходную информацию в задачах оптимизации ПЗ и ПР можно разделить на четыре вида: 1) детерминированную; 2) вероятностно-определенную, когда известны функции и параметры распределения случайных величин; 3) вероятностно-неопределенную, когда функции распределения случайных величин неизвестны; 4) собственно неопределенную.

С «полностью» неопределенной информацией на практике оперировать, как правило, не приходится, т. к. по любому параметру можно тем или иным способом, включая экспертные оценки специалистов, получить необходимый минимум ориентировочной информации. К детерминированной относится информация о стоимости ПЗ и ПР  $B$ , среднее значение которой однозначно определено нормативными документами. Информацию о стоимости аварийного восстановления, входящей в состав параметра  $A$ , можно отнести к условно детерминированной, поскольку она не может быть определена однозначно из-за некоторой ее зависимости от ряда случайных факторов, таких как внезапность отказов устройств ЖАТ, квалификация обслуживающего персонала и т. п. Информацию об ущербе от отказов ЖАТ в силу случайного (а иногда недостаточно определенного) характера можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

На практике большие трудности возникают с точной оценкой глубины ремонта  $\alpha$  и ее вклада в изменение показателей надежности ЖАТ, поскольку качество ПР зависит от случайных трудно учитываемых факторов, таких как состояние устройств ЖАТ, качество запасных частей и процедур ремонта, квалификация ремонтного персонала и др. В зависимости от наличия статистического материала информацию о параметре  $\alpha$  можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Особые трудности на практике возникают при выборе функции распределения  $F$  из-за малого объема статистического материала об отказах устройств ЖАТ. Достоверно определить функцию распределения существующим методом математической статистики возможно, если количество отказов устройств будет более ста. В этом случае информация о  $F$  будет вероятностно-определенной, в противном случае — вероятностно-неопределенной, т. к. при этом можно получить несколько возможных функций распределения. Информация о параметре  $q$  в зависимости от объема статистического материала об отказах устройств ЖАТ может быть вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Неопределенность исходной информации приводит к методическим и практическим трудностям решения задачи оптимизации ПЗ и ПР. При этом значительно повышается размерность решаемой задачи, поскольку появляется большое число возможных сочетаний информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Например, если задано три вида функции  $F$  и каждый из параметров  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  задан тремя значениями, то в этом случае имеет место 81 сочетание используемой информации, каждому из которых при решении задачи соответствует свое условно оптимальное значение параметров ПЗ и ПР.

Таким образом, неопределенность исходной информации приводит к неоднозначности решения оптимизационной задачи. Расчетным путем можно определить только зону, внутри которой каждая периодичность ПЗ и ПР при тех или иных сочетаниях исходной информации будет оптимальной. Такая зона названа академиком Л. А. Мелентьевым «зоной неопределенности оптимальных решений» [17]. Практическое следствие неопределенности исходной информации состоит в том, что неоднозначность результатов решения оптимизационной задачи приводит к неопределенности при выборе параметров ПЗ и ПР. Очевидно, что в этих условиях окончательное решение должно приниматься на эвристической основе и такой «субъективный» выбор при неопределенности исходной информации неизбежен.

Трудности и отрицательные последствия, связанные с неопределенностью исходной информации, можно преодолевать по двум направлениям: 1) уменьшением неопределенности самой информации; 2) разработкой соответствующих методов оптимизации и принятия решений в условиях неопределенности. Работы по первому направлению чрезвычайно трудоемки и дороги. Кроме того,

никакие усилия в этом направлении не позволят полностью ликвидировать неопределенность исходной информации. Поэтому весьма актуально проведение исследований по второму направлению с целью создания методов, позволяющих при неопределенности исходной информации принимать обоснованные решения по практически оптимальным параметрам ПЗ и ПР устройств ЖАТ.

### 3. Методические принципы решения задачи

Методы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности используемой исходной информации. Дадим классификацию задач оптимизации в зависимости от степени определенности информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Рассмотрим три степени определенности информации о функции распределения: 1)  $F$  и ее параметры известны; 2) известен только коэффициент вариации  $V$ ; 3) известна только наработка на отказ  $T$ . Первая степень соответствует вероятностно-определенной, вторая и третья — вероятностно-неопределенной информации. Рассмотрим три степени определенности информации о параметрах  $A, \alpha, q$ : 1) детерминированная; 2) вероятностно-определенная; 3) вероятностно-неопределенная.

Типы возможных оптимизационных задач представим в виде матрицы (см. табл. 1). Тип задачи характеризуется двойным индексом: первый индекс означает номер строки; второй — номер столбца. Номера строк соответствуют степени определенности информации о функции распределения, столбцов — о параметрах целевой функции. Все задачи, кроме 11 и 12, являются вероятностно-неопределенными.

**Таблица 1.** Типы возможных оптимизационных задач

Степень определенности информации о функции $F$	Степень определенности информации о параметрах $A, a, q$		
	1. Детерминированная	2. Вероятностно-определенная	3. Вероятностно-неопределенная
Известна $F$	11	12	13
Известен $V$	21	22	23
Известна $T$	31	32	33

В настоящее время в теории надежности разработаны только методы решения задач 11 [8, 9, 10] и 31 [10]. Поскольку на практике при оптимизации ПЗ и ПР необходимая исходная информация является, как правило, вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной, наибольший интерес представляет разработка методов решения задач типов 12, 13, 22, 23, 32, 33.

Один из возможных методологических подходов к решению перечисленных задач заключается в следующем. Решение вероятностно-неопределенных задач сводится к их вероятностно-определенному эквиваленту. Для этого значения параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  в случае вероятностно-определенной информации задаются математическим ожиданием, а в случае вероятностно-неопределенной информации — диапазоном значений. В последнем случае при отсутствии необходимых исходных данных параметры целевой функции оцениваются экспертным путем. Неизвестные функции распределения  $F$  выбираются эвристически. Причем для большей надежности получаемых решений необходимо задать несколько возможных функций распределения.

Для решения полученной эквивалентной вероятностно-определенной задачи можно применять известные методы, позволяющие находить оптимальные решения, соответствующие математическому ожиданию целевой функции вида

$$C(\tau/\alpha) = \min M[C(\tau; A, B, \alpha; P, q)],$$

где  $M$  — знак математического ожидания.

В результате решения такой задачи необходимо определять не только формально оптимальные параметры ПЗ и ПР для каждой предварительно принятой функции распределения  $F$ , но также зону всех возможных условно оптимальных значений исходя из диапазона изменения параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  или заданного коэффициента точности оптимизации  $K$ . В условиях неопределенности исходной информации формализованные методы решения поставленной задачи являются необходимым, но лишь вспомогательным инструментом, позволяющим при использовании вычислительной техники автоматизировать чрезвычайно трудоемкий, но неизбежный процесс поиска условно оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Окончательный выбор решений проводят специалисты, с учетом опыта эксплуатации и с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Решение задачи оптимизации ПЗ и ПР с использованием предложенного методического подхода состоит из следующих основных этапов.

1. Проводится сбор исходных данных об отказах, стоимости ПЗ и ПР и аварийного восстановления, а также об ущербе от отказов устройств ЖАТ, на основании которых определяется необходимая для решения задачи исходная информация о функции распределения  $F$  и параметрах целевой функции  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $q$ .

2. В зависимости от степени определенности исходной информации по таблице 1 выбирается тип решаемой оптимизационной задачи.

3. Для вероятностно-неопределенных задач выбирается множество функции распределения  $F$ , оценивается диапазон значений параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  и задается коэффициент точности оптимизации  $K$ .

4. По  $C$ -критерию:

- в случае вероятностно-определенных задач вычисляется оптимальная периодичность ПЗ и ПР и соответствующий ей минимум целевой функции;

— в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения  $F$  вычисляется множество оптимальных периодичностей ПЗ и ПР и соответствующее им множество минимальных значений математического ожидания целевой функции. Затем при заданном коэффициенте  $K$  определяется диапазон нижних и верхних значений периодичности и устанавливается зона условно-оптимальных значений параметров ПЗ и ПР.

#### 5. По $P$ -критерию:

— в случае вероятностно-определенных задач вычисляется допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ и ПР;

— в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения  $F$  определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности ПЗ и ПР и из него выбирается наименьшее.

6. Полученные по  $C$ - и  $P$ -критериям значения сравниваются, и определяется зона целесообразных значений периодичности ПЗ и ПР.

7. Производится анализ полученной зоны целесообразных значений и принятие окончательного решения о практически оптимальных значениях параметров ПЗ и ПР устройств ЖАТ.

Проиллюстрируем решение оптимизационных задач на этапах 4, 5 и 6.

**Задачи 11 и 12.** По  $C$ -критерию находится оптимальное значение периодичности ПЗ (ПР)  $\tau_o$  и минимальное значение целевой функции  $C_o$ , а по  $P$ -критерию — допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ (ПР)  $\tau_d$ . Тогда целесообразные значения периодичности  $\tau_{ц}$  лежат в диапазоне: при  $\tau_o < \tau_d$   $\tau_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_d$ , а при  $\tau_o > \tau_d$   $\tau_{ц} \leq \tau_d$ .

**Задача 13.** По  $C$ -критерию определяется  $\tau_o$  и  $C_o$ , а также при заданном коэффициенте  $K$  нижнее  $\underline{\tau}_o$  и верхнее  $\bar{\tau}_o$  значения ПЗ (ПР). По  $P$ -критерию определяется  $\tau_d$ . Тогда получаем: 1) при  $\bar{\tau}_o < \tau_d$   $\underline{\tau}_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_o$ ; 2) при  $\underline{\tau}_o < \tau_d < \tau_o$   $\underline{\tau}_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_d$ ; 3) при  $\underline{\tau}_o > \tau_d$   $\tau_{ц} \leq \tau_d$ .

На рисунке 1 представлен принцип решения задачи 13 для случая 1, из которого видно, что целесообразные значения периодичности при заданной точности оптимизации  $K$  находятся в диапазоне  $\underline{\tau}_o \dots \bar{\tau}_o$ , определенные по  $C$ -критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности ПЗ (ПР) является критерий минимума удельных эксплуатационных затрат.

**Задачи 21, 22, 31 и 32.** По  $C$ -критерию для множества функций распределения  $\{F^1, F^2, \dots, F^n\}$  определяется множество оптимальных значений периодичности  $\{\tau_o^1, \tau_o^2, \dots, \tau_o^n\}$  и соответствующее ему множество минимальных значений целевой функции  $\{C_o^1, C_o^2, \dots, C_o^n\}$ . Зона условно оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений  $\tau_o^{\min} \dots \tau_o^{\max}$ . По  $P$ -критерию определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности  $\{\tau_d^1, \tau_d^2, \dots, \tau_d^n\}$ , и из него выбирается наименьшее  $\tau_d^{\min}$ . Тогда получаем: 1) при  $\tau_o^{\max} < \tau_d^{\min}$   $\tau_o^{\max} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\max}$ ; 2) при  $\tau_o^{\min} < \tau_d^{\min} < \tau_o^{\max}$   $\tau_o^{\min} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\min}$ ;

3) при  $\tau_o^{\min} > \tau_d^{\min}$   $\tau_{\text{ц}} \leq \tau_d^{\min}$ . На рисунке 2 представлен принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3 при трех функциях распределения  $F$ . Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений  $0 \dots \tau_d^{\min}$ , определенных по  $P$ -критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности является критерий безопасности ЖАТ.

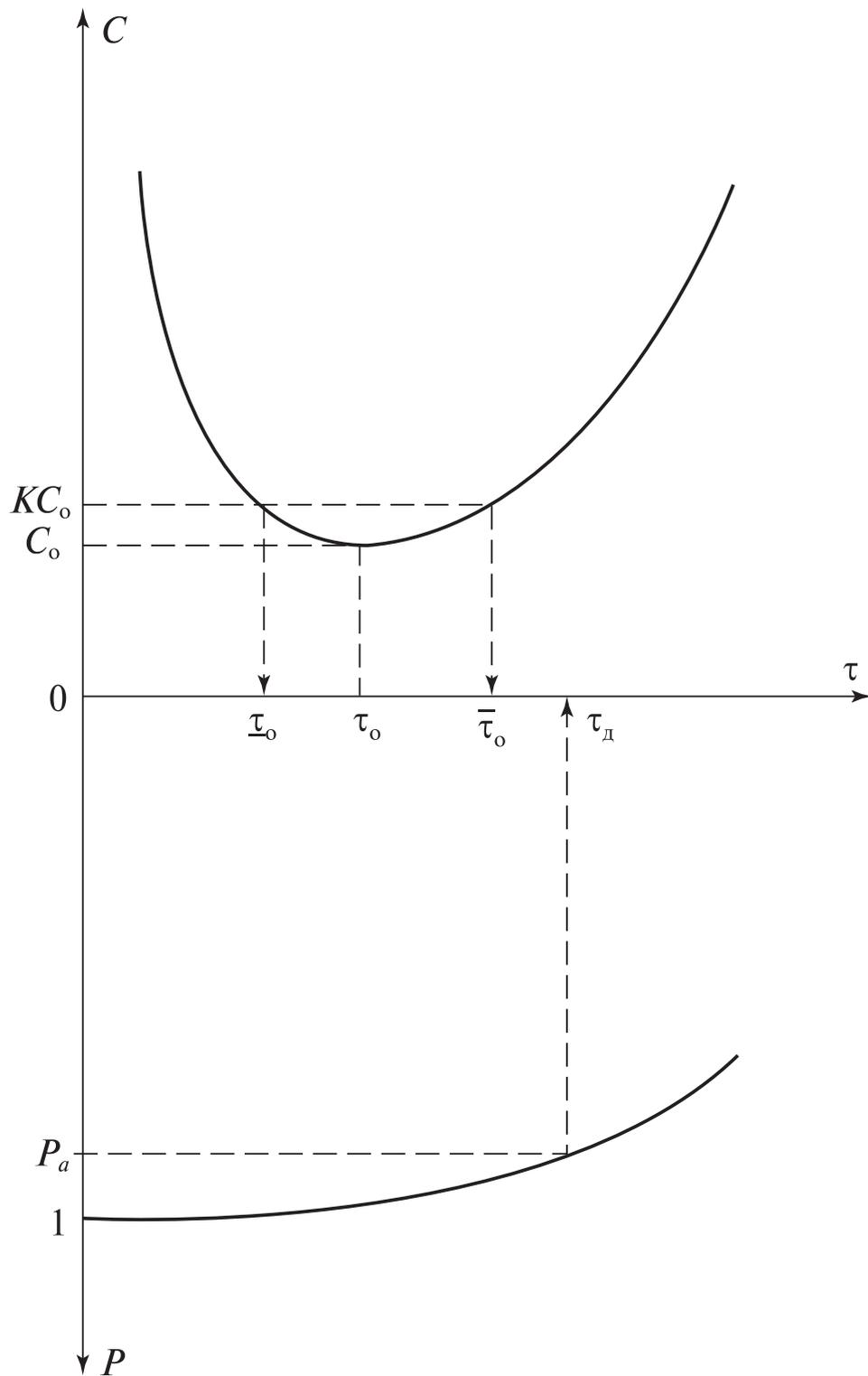
**Задачи 23 и 33.** По  $C$ -критерию для множества  $\{F^1, F^2, \dots, F^n\}$  определяется множество  $\{\tau_o^1, \tau_o^2, \dots, \tau_o^n\}$  и соответствующее ему множество  $\{C_o^1, C_o^2, \dots, C_o^n\}$ , а также при заданном  $K$  множество верхних и нижних значений периодичности  $\{\underline{\tau}_o^1, \bar{\tau}_o^1; \underline{\tau}_o^2, \bar{\tau}_o^2; \dots; \underline{\tau}_o^n, \bar{\tau}_o^n\}$ . Зона условно оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений  $\underline{\tau}_o^{\min}, \bar{\tau}_o^{\max}$ . По  $P$ -критерию определяется множество  $\{\tau_d^1, \tau_d^2, \dots, \tau_d^n\}$ , и из них выбирается  $\tau_d^{\min}$ . Тогда получаем: при 1)  $\bar{\tau}_o^{\max} < \tau_d^{\min}$   $\underline{\tau}_o^{\min} \leq \tau_{\text{ц}} \leq \tau_d^{\max}$ ; 2) при  $\underline{\tau}_o^{\min} < \tau_d^{\min} < \bar{\tau}_o^{\min}$   $\underline{\tau}_o^{\min} \leq \tau_{\text{ц}} \leq \tau_d^{\min}$ ; 3) при  $\underline{\tau}_d^{\min} > \tau_d^{\min}$   $\tau_{\text{ц}} \leq \tau_d^{\min}$ . На рисунке 3 представлен принцип решения задач 23 и 33 для случая 2 при трех функциях распределения. Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений  $\underline{\tau}_o^{\min} \dots \tau_d^{\min}$ , определенных по  $C$ - и  $P$ -критериям. Таким образом, в данном случае можно обеспечить как экономически целесообразное при заданной точности оптимизации значение удельных эксплуатационных затрат, так и заданное по условиям обеспечения безопасности значение вероятности безотказной работы ЖАТ.

## Заключение

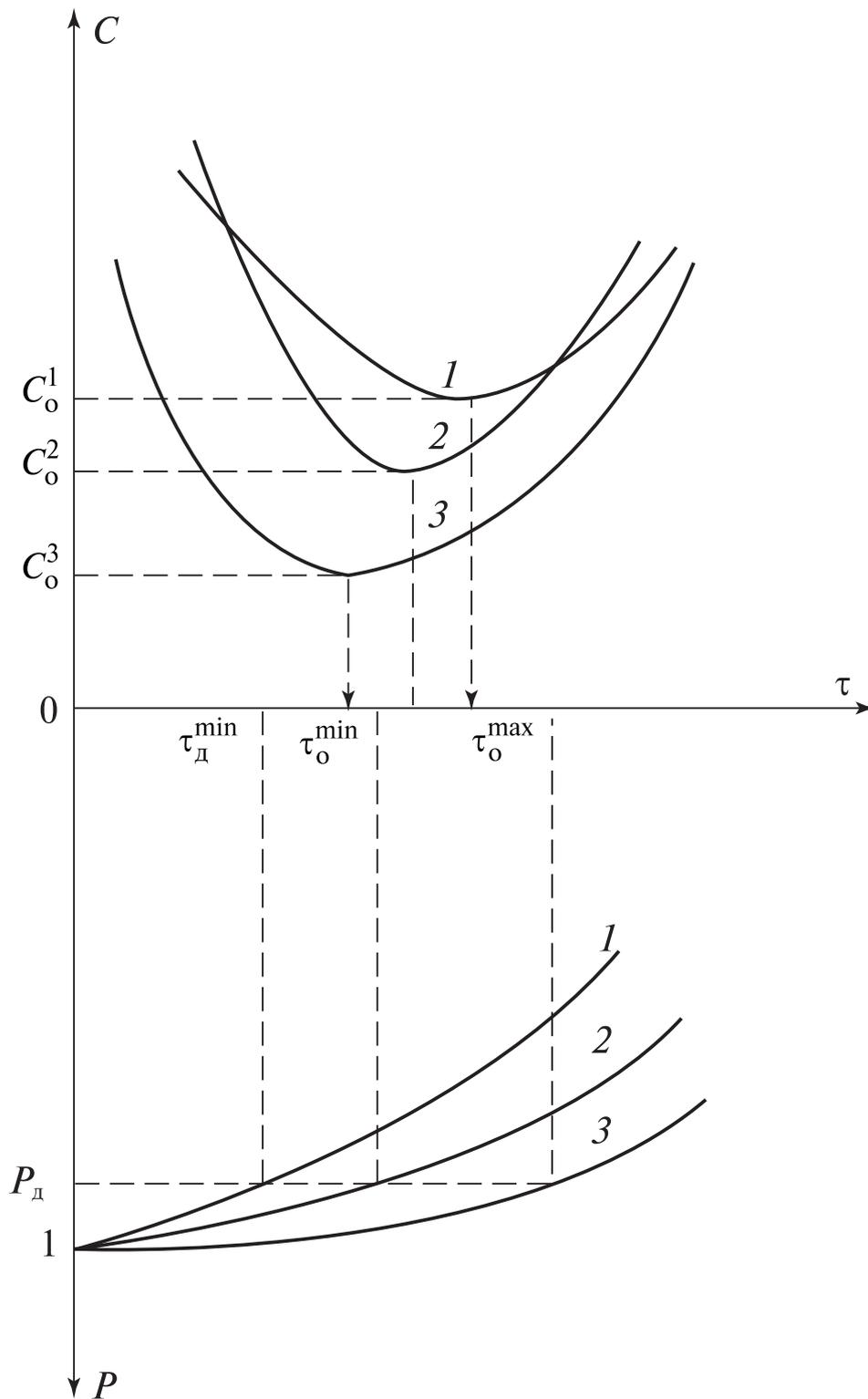
В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации технического содержания целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимый по условиям обеспечения безопасности уровень вероятности безотказной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Решение задачи оптимизации технического содержания усложняется из-за неопределенности исходной информации, проявляющейся в погрешности численных значений параметров целевой функции и в недостоверном описании функций распределения показателей надежности. Неопределенность исходной информации повышает размерность задачи, приводит к неоднозначности результатов ее решения и выбора периодичности технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Учет факторов неопределенности при оптимизации технического содержания обладает рядом преимуществ. Во-первых, имеет значение наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Во-вторых — обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа



**Рис. 3.** Принцип решения задачи 13 для случая 1



**Рис. 4.** Принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3

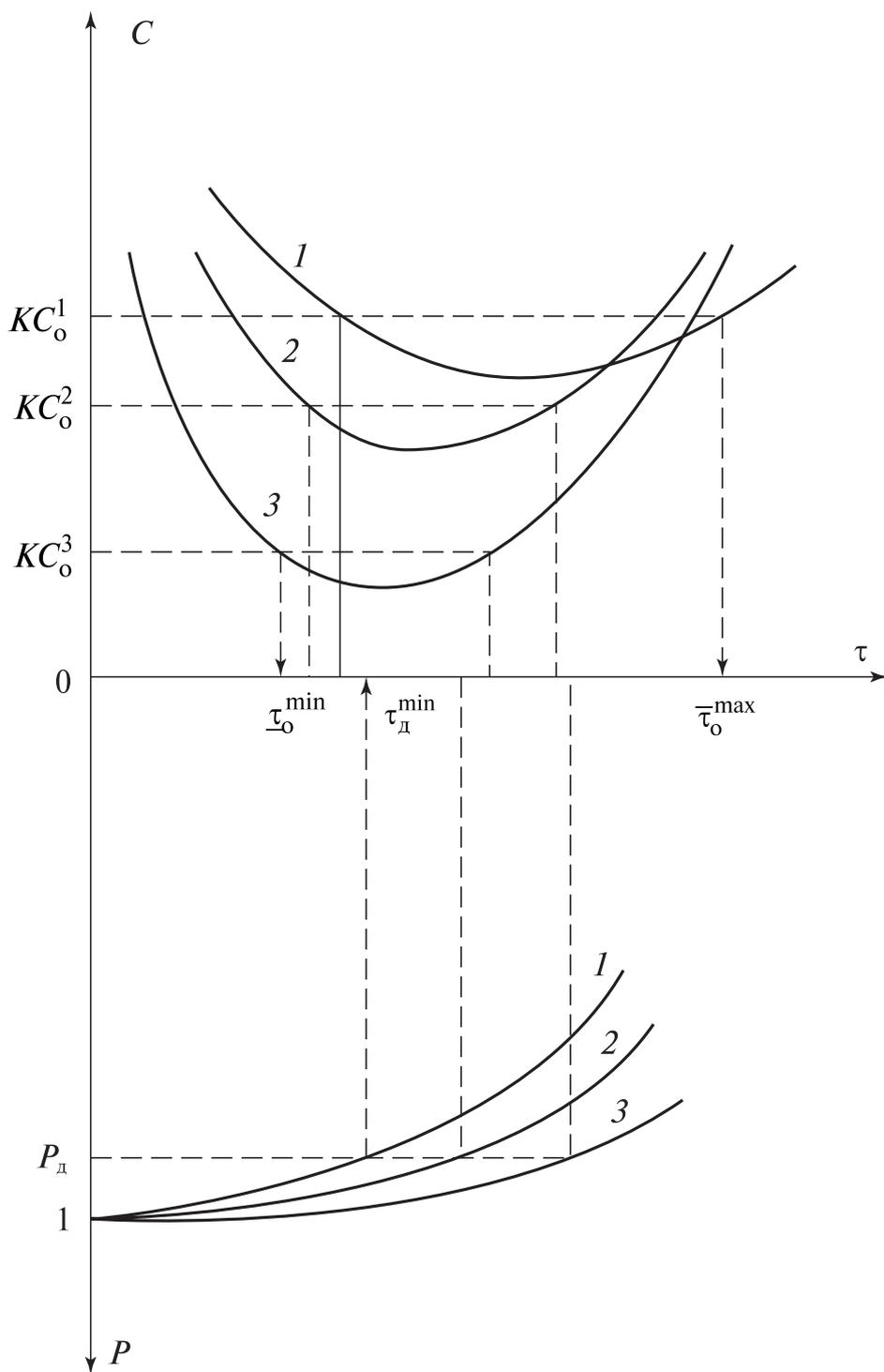


Рис. 5. Принцип решения задач 23 и 33 для случая 2

на их основе последствий принятых решений. В-третьих — свобода выбора наиболее гибких решений из числа практически равно экономичных. В-четвертых — возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

Решение вероятностно-неопределенных задач оптимизации технического содержания целесообразно свести к их вероятностно-определенному эквиваленту путем задания диапазона значений параметров целевой функции и выбора наиболее вероятных функций распределения показателей надежности.

Целью формализованного решения вероятностно-неопределенных задач технического содержания является определение зоны условно оптимальных значений периодичностей, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен проводиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

### Библиографический список

1. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016.
2. Федотов А. Е. Методы оценки периода технического обслуживания устройств // Автоматика, телемеханика, связь. — 1981. — № 11. — С. 10–12.
3. Волков В. М., Брейда А. И., Сорокин В. М., Чиракадзе В. А. Изменение стратегии технического обслуживания — путь повышения производительности труда // Автоматика, телемеханика, связь. — 1987. — № 1. — С. 16–18.
4. Шаманов В. И. Эволюция во времени ресурса СЖАТ // Автоматика, телемеханика, связь. — 1997. — № 12. — С. 20–24.
5. Дмитренко И. Е., Ульянов В. М. Расчет оптимальных сроков технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. — 1998. — № 7. — С. 33–34.
6. Горелик А. В. Математическая модель для расчета периодичности технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. — 2002. — № 7. — С. 40–41.
7. Шаманов В. И. Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 4. — С. 481–492.
8. Barlow R. E., Proschan F. *Mathematical Theory of Reliability*. — New York: John Wiley & Sons, 1965. — 351 p.
9. Toshio Nakagava. *Maintenance theory of reliability*. — London: Springer-Verlag, 2005. — 274 p.
10. Rausand M., Hoyland A. *System Reliability Theory*. — New York: John Wiley & Sons, 2011. — 151 p.
11. Gertsbakh I. *Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance*. — New York: Springer, 2012. — 112 p.
12. Каштанов В. А., Медведев А. И. *Теория надежности сложных систем*. — М.: Физматлит, 2010. — 608 с.
13. Володарский В. А. *Оптимизация предупредительных замен и ремонтов технических устройств*. — Saarbruken: Lamber, 2015. — 76 с.

14. Володарский В. А. Восстановление надежности и стратегии технического содержания устройств // Методы менеджмента качества. — 2015. — № 2. — С. 54–58.
15. Volodarsky V. A. About optimizing of lines and networks maintenance // Reliability: Theory & Applications. — 2016. — Vol 11. — No 1. — P. 21–24.
16. Volodarsky V. A. About trigonometric distributions to describe the failure of technical devices // Reliability: Theory & Applications. — 2016. — Vol 11. — No 2. — P. 11–17.
17. Мелентьев Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. — М.: Высшая школа, 1983. — 319 с.

### V. A. Volodarsky

*Department of «Train Movement Systems»,  
Krasnoyarsk Institute of Rail Transport, Krasnoyarsk*

## OPTIMIZATION OF TECHNICAL MAINTENANCE OF AUTOMATION AND REMOTE CONTROL DEVICES WITH SOURCE DATA UNCERTAINTY

The source data that can actually be collected and prepared to optimize the technical maintenance of railway automation and remote control devices are, in general, largely uncertain. The problem manifests itself in an inaccurate knowledge of the numerical values of the initial parameters or their probabilistic description. Therefore, it becomes apparent that the methods of optimization calculations based on completely certain data are increasingly coming into conflict with reality.

The article discusses a methodological approach to the formulation and solution of the problem of optimizing the technical maintenance of railway automation and remote control devices under the conditions of source data uncertainty. Within an integrated approach, it is advisable to consider the minimum specific operating costs and the probability of failure-free operation of railway automation and remote control devices admissible under the safety conditions as the main criteria for optimizing the technical maintenance. The purpose of a formalized solution of probabilistic and uncertain technical maintenance problems is to determine the zone of conditionally optimal values of periodicities, the width of which depends on the degree of certainty of the source data. The final choice of solutions should be made by experts with the use of additional non-formalized criteria.

Taking into account the uncertainty factors applied when making decisions about the parameters of the technical maintenance provides several advantages. The first of them is the closest approximation of formalized solution methods to actual operating conditions. The second one is the obligatory nature of multivariate calculations and the possibility to analyze on their basis the consequences of decisions made. Third is the freedom of choice of the most flexible solutions from among the almost equally cost-effective options. And finally, the fourth advantage is the possibility of making more informed decisions and reducing the risk of overspending due to uncertainty.

railway automation and remote control, technical maintenance, optimization, periodicity, data, uncertainty

### References

1. GOST 32192–2013. Nadezhnost' v zheleznodorozhnoy tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [Dependability in railway technics. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian)

2. Fedotov A. E. (1981) Metody otsenki perioda tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv [Methods for assessing device maintenance periods]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], no. 11, pp. 10–12. (In Russian)
3. Volkov V. M., Breyda A. I., Sorokin V. M. & Chirakadze V. A. (1987) Izmeneniye strategii tekhnicheskogo obsluzhivaniya — put' povysheniya proizvoditel'nosti truda [Changing technical maintenance strategies — a way to increase labor productivity]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], No. 1, pp. 16–18. (In Russian)
4. Shamanov V. I. (1997) Evolyutsiya vo vremeni resursa SZhAT [Evolution of time resource of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], no. 12, pp. 20–24. (In Russian)
5. Dmitrenko I. E. & Ul'yanov V. M. (1998) Raschet optimal'nykh srokov tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Calculation of optimal terms for maintenance of railway automation and remote control devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, computer science], no. 7, pp. 33–34. (In Russian)
6. Gorelik A. V. (2002) Matematicheskaya model' dlya rascheta periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [A mathematical model for calculating the frequency of maintenance of railway automation and remote control devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, computer science], no. 7, pp. 40–41. (In Russian)
7. Shamanov V. I. (2016) Metody optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya sistem avtomatiki [Methods of optimizing the maintenance of automation systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 4, pp. 481–492. (In Russian)
8. Barlow R. E. & Proschan F. (1965) Mathematical Theory of Reliability. New York, John Wiley & Sons, 351 p.
9. Toshio Nakagava (2005) Maintenance theory of reliability. London, Springer–Verlag, 274 p.
10. Rausand M. & Hoyland A. (2011) System Reliability Theory. New York, John Wiley & Sons, 151 p.
11. Gertsbakh I. (2012) Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance. New York, Springer, 112 p.
12. Kashtanov V. A. & Medvedev A. I. (2010) Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem [The reliability theory of complex systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 608 p. (In Russian)
13. Volodarsky V. A. (2015) Optimizatsiya predupreditel'nykh zamen i remontov tekhnicheskikh ustroystv [Optimization of preventive replacement and repair of technical devices]. Saarbruken, Lambert, 76 p. (In Russian)
14. Volodarsky V. A. (2015) Vosstanovleniye nadezhnosti i strategii tekhnicheskogo sodержaniya ustroystv [Restoring reliability and technical maintenance strategies for devices]. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of Quality Management], no. 2, pp. 54–58. (In Russian)
15. Volodarsky V. A. (2016) About optimizing of lines and networks maintenance. *Reliability: Theory & Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 21–24. (In Russian)
16. Volodarsky V. A. (2016) About trigonometric distributions to describe the failure of technical devices. *Reliability: Theory & Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 11–17. (In Russian)

17. *Melent'yev L. A.* (1983) *Optimizatsiya razvitiya i upravleniya bol'shikh sistem energetiki* [Optimizing the development and management of large-scale power engineering systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 319 p. (In Russian)

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

*Поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 03.03.2020*

**ВОЛОДАРСКИЙ Владислав Афанасьевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта;

*e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru*

© Володарский В. А., 2020

# МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 62.799

**Ю. В. Алеветдинова**

*Кафедра «Наземные транспортно-технологические средства»,  
Российский университет транспорта, Москва*

## СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПОДВИЖНОЙ ЕДИНИЦЫ

Статья посвящена изучению методов диагностики, используемых в динамической работе дорожных строительных машин. Описаны существующие способы, которые в дальнейшем могут быть использованы при создании экспертной системы диагностики. Рассмотренные в статье методы диагностики (в основном методы неразрушающего контроля) в интеллектуальных системах могут повысить точность диагностирования и прогнозирования состояния металлоконструкций.

Срок службы металлоконструкции зависит от многих факторов, таких как силовые воздействия, динамичность нагрузки, агрессия внешней среды, воздействие высоких температур и т. д. Возможно продлить срок службы изделий за счет повышения точности и своевременности диагностирования. В статье рассмотрена архитектура экспертной системы, наглядно показывающая связи между подсистемой и динамически изменяемыми свойствами системы. Предложенная архитектура способна обеспечить наиболее полный анализ поведения сложных технических систем и оперативность принятия экспертных решений. Предлагается использовать комплексный подход в работе экспертных систем, в которых предпочтение отдается более общим и менее связанным с предметной областью теоретическим методам, чаще всего математическим. Автор представил также математическую модель, отражающую логику решений экспертной системы.

экспертная система, динамика, неразрушающий контроль, синергетический подход, самосознание, прогнозирование, нечеткая логика

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-25-37

### Введение

В производстве, обслуживании, перевозках, строительстве, в повседневной жизни мы используем различные металлоконструкции, из которых состоят автомобили, поезда, самолеты или техника, каждое утро чистящая дороги. Техническое обслуживание (ТО) каждой из этих машин ведется по специальному графику, рассчитанному на основании определенных параметров, которые могут быть как постоянными, так и переменными. Расчет графика обслуживания и ремонта производится для класса машин, но не для каждой единицы в отдельности. К сожалению, рассчитанный график ТО для класса машин может не соответствовать установленному следующему графику из-за условий работы металлоконструкций. Существует также риск непроявленной трещины либо другого дефекта, скрытого в глубине металла.

Особое внимание уделяется диагностике технического состояния тех классов машин, которые эксплуатируются с высокими нагрузками. Возникает большая вероятность снижения несущей способности металлической конструкции, что может привести к человеческим травмам, авариям, серьезным материальным затратам.

Комплексный подход с применением методов диагностики, описанных в этой статье, существенно расширит спектр измеряемых параметров, что позитивно повлияет на качество эксплуатации.

Эксплуатируемые машины стоит диагностировать в процессе работы, а это возможно только при применении методов неразрушающего контроля. Те из них, что используются для обнаружения дефектов по типу разрушения сплошности материала изделий, мониторинга геометрических параметров, анализа физико-химических свойств материала, дают возможность изучить качество изделий без перебоев в эксплуатации. Одно из главных преимуществ методов неразрушающего контроля в том, что при их применении удобно исследовать изделие на каждой ступени производства, не оказывая при этом влияния на свойства, параметры и качество.

### 1. Методы контроля состояния металлоконструкции

Методы диагностирования металлоконструкций бывают разрушающими и неразрушающими (табл. 1).

Результаты первого варианта таких методов позволяют изготовить металлоконструкции максимальной прочности для реализации возложенных на них функций и определить меры предосторожности по их эксплуатации.

Для повышения срока эксплуатации следует оценить прочность и надежность сварных конструкций и соединений, качества присадочного и основного металла, правильность следуемой технологии, а также квалификацию специалистов по сварке.

**Таблица 1.** Методы контроля состояния металлоконструкции

Методы контроля состояния	Виды КСМК	Место проведения
механическая или динамическая проверка сварных соединений	проверка целостности соединения при изгибе, разрыве и др. деформации; макро- и микроструктурный методы анализа	в лаборатории (испытания)
методы контроля при специфических условиях	проверка конструкций, предназначенных для работы с очень низкими или очень высокими температурами	в лаборатории (испытания)
методы неразрушающего контроля	см. табл. 2	на месте; в лаборатории

**Таблица 2.** Методы и типы неразрушающего контроля

Типы НК	Методы неразрушающего контроля
акустический	теневого, эхо-метод, зеркально-теневого, эхо-зеркальный
магнитный	магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, индукционный
тепловой	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения и др.
электромагнитный (вихретоковый)	вихретоковый с использованием накладных, проходных, погружных и экранных вихретоковых преобразователей
оптический	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения
электрический	электрические методы
проникающими веществами	цветной (хроматический), яркостный (ахроматический), люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующихся частиц, комбинированный
радиационный	рентгеновский, гамма-, бета-, нейтронный, позитронный и др.
радиоволновой	прошедшего излучения, отраженного излучения, собственного излучения

Для успешного мониторинга необходимо выполнить контрольные пробы указанных форм и размеров.

Определение структуры металла сварных соединений и установление местонахождения, характера и наличия дефектов являются основными задачами проводимых исследований.

Разрушение металлоконструкции в первостепенные задачи не входит, поэтому наиболее часто в современном мире используются методы неразрушающего контроля (табл. 2) [1].

Среди методов неразрушающего контроля главенствующее место занимает оптический контроль. Его используют для проявления дефектов типа нарушения сплошности, проверки геометрических характеристик, фиксирования физико-механических характеристик, технической диагностики для предположения образования различных дефектов [2].

Выбор подходящего метода зависит как от физико-химических свойств диагностируемого объекта, так и от различных характеристик и условий проводимого изучения. Прибор выбирают также в зависимости от характера дефекта и разрешающей способности. Однако ни один из представленных типов контроля нельзя назвать универсальным, поскольку они не позволяют эффективно оценить все характеристики изделия [3].

В процессе эксплуатации металлической конструкции основными критериями становятся усталость и истощение трещиностойкости. На поверхности

и в близлежащих слоях проявляется усталостная повреждаемость, и необходимо определить наличие дефекта, находящегося на первой стадии. Далее в самое короткое время нужно провести количественную оценку с применением приборов. Если дефект перешел на вторую стадию, определить его можно только с помощью увеличительных средств [4, 14].

При эксплуатации детали механизмов претерпевают аварийное или естественное изнашивание. Наибольшее распространение получил визуально-оптический метод контроля посредством специального инструмента для измерения. Осмотр и диагностику электрооборудования грузоподъемных машин осуществляют с помощью лупы и набора инструментов.

Для содержания разнообразных транспортных средств требуются большие затраты. Плановый ТО и ремонт, а также внеплановые ремонты проводятся главным образом для увеличения срока эксплуатации и сохранения работоспособности изделий [16].

Исследования с применением методов диагностики дают возможность снизить трудоемкость и стоимость эксплуатации. Безотказность работы, повышенная ремонтно- и контролепригодность объектов будут показателями улучшения состояния изделия.

## 2. Экспертная система

Все вышеописанные методы позволяют исследовать металлическое изделие в статичном состоянии. Экспертная система диагностики работает на основе широкой базы данных. Она состоит из множества алгоритмов и фактов, описывающих работу метода и текущих вводных данных; блока приобретения знаний, призванного обеспечить поддержку в процессе работы; механизма вывода; подсистемы объяснений, играющей роль «самосознания» системы, которая обеспечивает анализ и аргументирование решений.

Повышение безопасности и снижение количества ошибок диагностики позволяют наиболее точно составить календарь эксплуатации [8, 20]. Это возможно при использовании программы, которая будет способна провести процедуру технической диагностики. Программа обязательно должна самообучаться, делать прогноз дальнейшего состояния изделия, проектировать и оптимизировать полученные данные.

В ходе разработки экспертной системы нужно преодолеть несколько фаз.

Первая — идентификации проекта (включает в себя определение проблемы, основные характеристики будущей системы, необходимые ресурсы для начала разработки и разработку техзадания).

Вторая — построение концептуальной модели проблемы и выделенных задач (на этом этапе большую роль играют знания и информация о работе каждого метода диагностики).

Третья — формализация задачи (в ходе этой фазы рассматриваются возможные инструменты для реализации экспертной системы, дорабатывается модель системы и выполняется структурирование знаний).

Четвертая — реализация (подбирается инструментарий, экспертная система переводится в формат инструментов ввода и вывода, выбирается модель объяснения вывода).

Пятая — тестирование (испытываются различные схемы выводов, тестируются все подсистемы, проводится отладка с помощью привлечения экспертов, не принимавших участие в разработке баз знаний).

Самыми важными следует считать первую и вторую фазы, ведь невнимательное отношение к ним может обернуться необходимостью возврата к началу проектирования [9, 17].

В связи с тем, что эта модель системы будет работать с данными, полученными с датчиков-преобразователей, следует использовать нечеткую экспертную систему. В вышеуказанные фазы следует добавить блок рассуждений, способный учитывать все правила нечеткой логики и применять методы работы с ней, и блок дефазификации, преобразующий множество в единственное значение, которое, в свою очередь, используется в последующих расчетах.

Другая статистическая модель системы профилактики металлоконструкций практически реализована в системе информационной поддержки оптимизации периодичности контроля состояния металлоконструкций.

Сам процесс принятия решений основан на модели объекта управления, что может быть определено как совокупность статических и динамических объектов. Процесс построения является не чем иным, как процессом выявления системы элементов, составляющих проблему, а также установления связей между ними и закономерностей их поведения.

Основой экспертной системы являются следующие виды работы:

- получение данных с датчиков;
- расчет показателей системы профилактики металлических конструкций;
- оптимизация периода профилактического восстановления металлоконструкции;
- оптимизация критического уровня линейного размера контрольной площадки;
- совместная оптимизация параметров режима профилактики;
- вывод результата [8, 18].

Вывод результата отправляется на экран компьютера. Его можно сохранить в таблицу или текстовый файл, который укажет пользователь.

Основой экспертной системы является база знаний. Одно из важнейших отличий экспертной системы от остальных существующих систем — ее принцип работы. Экспертная система использует базу знаний для решения определенных проблем в специфических областях. Такая система обычно использует математические методы (а не теоретические), т. к. их возможно применить к более обширным областям [10, 14].

Представляя конструкцию экспертной системы как стремящуюся к самоорганизации, расширяем ее, наращивая вокруг основы — динамической подсистемы — другие модули. Среди них — модуль диагностирования эффективности системы (расчет КПД в новых условиях функционирования), модуль диагностирования ситуации без изменения структуры существующей системы автоматического регулирования (для передачи в АСУ), модуль надежности (диагностирование структурных параметров) и др. Важный пункт комплексного подхода — учет взаимодействия разнохарактерных факторов, который обуславливает эффективность методов неразрушающего контроля. Такой подход помогает раскрыть принципы самоорганизации систем. Она определяется здесь через взаимодействие элементов систем, направленное на их сохранение как процесс, в ходе которого создается (воспроизводится) организация сложной системы [10].

Математическое понимание принципа самоорганизации систем основано на применении логических структур, описывающих «организующие» отношения между элементами систем, что позволяет оценивать процессы самоорганизации, используя системно-структурный анализ. Системно-структурный подход обоснования принципа самоорганизации системы (экспертной системы) основывается на заключении о том, что «авторегенеративной системой является тройка категорий — вещь, свойство, отношение, которые могут определяться только друг через друга». Исходя из этого положения, рассмотрим категорию отношения в качестве причинно-следственных связей, приводящих к согласованному поведению динамической подсистемы и других элементов экспертной системы. Более того, категорию отношения нужно рассматривать и в качестве организующих взаимодействий элементов внутри самой динамической подсистемы, т. е. она также может быть представлена как система самоорганизации. Это положение позволяет использовать динамическую подсистему в качестве идентификатора состояния технической системы [8].

Таким образом, явление самоорганизации здесь — реализация взаимоотношения динамической подсистемы как системы самоорганизации с другими модулями на основе математического моделирования их логических связей, изменяющихся во времени, в результате которых устанавливаются новые свойства элементов экспертной системы при наличии математического описания динамической подсистемы и отдельных элементов экспертной системы [19].

Методологическое обоснование выбора предлагаемой архитектуры экспертной системы можно представить следующим образом на рисунках 1 и 2.

Отличие данной архитектуры экспертной системы от уже известных — в связях между динамической подсистемой с свойствами объекта, которые могут изменяться в ходе диагностирования. Каждый изменяемый параметр влияет на подход, который система должна задействовать для наиболее обширного спектра диагностики [11, 20].

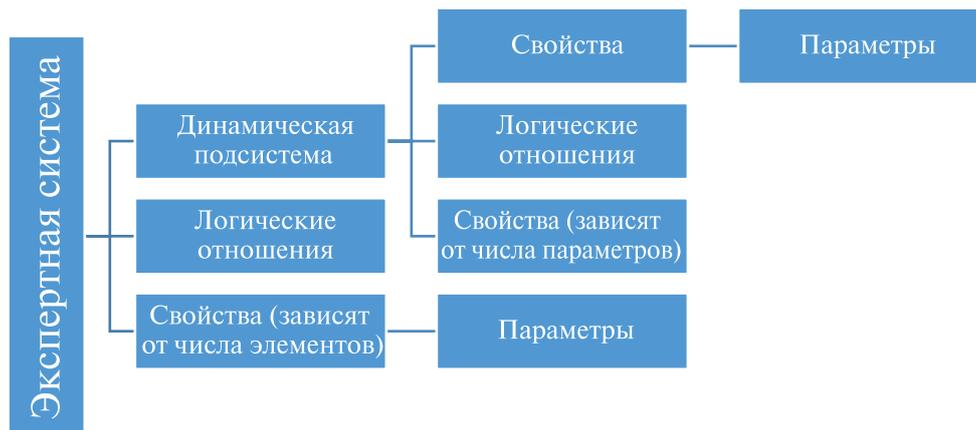


Рис. 1. Архитектура экспертной системы

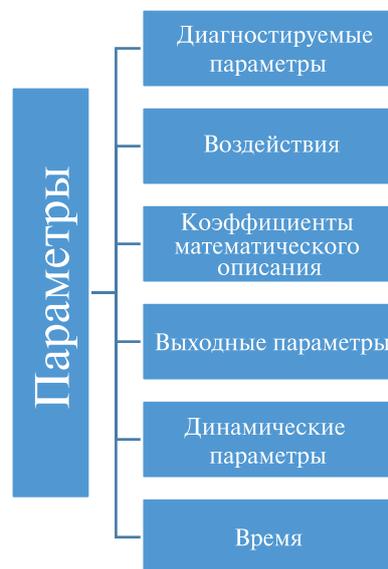


Рис. 2. Параметры, влияющие на работу экспертной системы

Уравнение, описывающее предложенную архитектуру экспертной системы, имеет следующий вид:

$$ES = \left( \left( D(P(t)(x_0(t), x_1(t), x_2(t), z(t), k(t), y(t), d(t))), R(t), P(t) \right) \right), \quad (1)$$

$$R(t), (P_i(t)(x_1(t), z_i(t), k_i(t), y_i(t)))$$

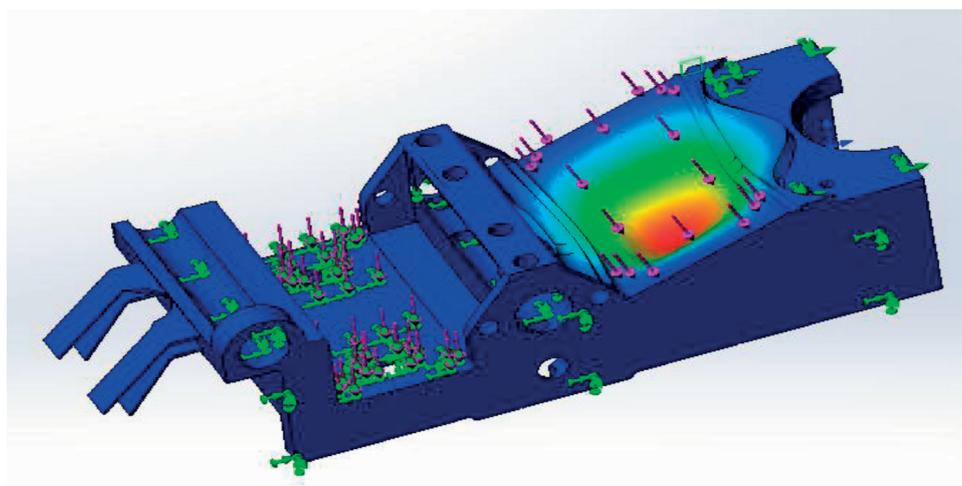
где  $ES$  — экспертная система;  $D$  — динамическая подсистема;  $P$  — свойства элементов экспертной системы;  $R$  — логические отношения;  $x$  — воздействия ( $x_0$  — воздействие исходного режима,  $x_1$  — воздействие внешнего характера,  $x_2$  — воздействие внутреннего характера);  $z$  — диагностируемые параметры;  $k$  — коэффициенты математического описания;  $y$  — выходные параметры;  $d$  — динамические параметры;  $t$  — время;  $i$  — число элементов экспертной системы.

У описанной выше архитектуры несколько различных используемых параметров, которые характеризуют изделие. Динамическая подсистема, зависящая от набора определенных параметров, становится гибкой, что позволяет проводить диагностику с более высокими показателями точности.

В качестве примера рассмотрим особенности организации процесса диагностирования тележки подвижного состава. Из-за риска деформации металла в процессе эксплуатации необходим контроль напряженно-деформированного состояния. Остановимся на основных параметрах, которые нужны, чтобы описать уравнение системы диагностирования и получить схему расположения напряжений как результат расчетов, внесенный в программный комплекс SolidWorks по раннее смоделированному сборочному чертежу надрессорной балки тележки КВЗ ЦНИИ М (рис. 3).

Выявленное местоположение с высоким риском образования напряженных участков указывает, какие именно места стоит подвергнуть более точному исследованию [9]. Реализация комплексной системы диагностирования проходит в несколько этапов. Сначала определяют возможное местонахождение высоких напряжений, что также включает в себя определение влияний внешней среды (они оказывают прямое воздействие на скорость возникновения опасных напряжений). Затем проводят сравнение по параметрам, указывающим на целесообразность применения того или иного метода контроля. Далее ведут сбор данных методом, выбранным на этапе сравнения. По внесенным протоколам расчета система вычисляет исходный результат и передает на экран рабочего компьютера или сохраняет в текстовый файл.

Время эксплуатации пассажирского вагона, на котором установлена балка, характеристики воздействия окружающей среды, динамические параметры (воздействие вибрации, случайных напряжений в ходе движения), характеристика исходного состояния конструкции (в зависимости от применяемого



**Рис. 3.** Схема расположения напряжений надрессорной балки пассажирского вагона

метода контроля), а также параметры, подвергаемые диагностике, составляют уравнение экспертной системы. Динамическая подсистема зависит от каждого изменяемого параметра и в свою очередь влияет на работу экспертной системы.

Экспертная система с вышеприведенной архитектурой охватывает больше одной единицы мониторинга, что позволяет с более обширной базой полученных данных передать результат на указанную метку приемника.

## Заключение

Исследование методов неразрушающего контроля в диагностике на железных дорогах — важный шаг в повышении безопасности движения и перевозке людей. Методы, применяемые в статичном положении предмета исследования, можно использовать и в динамике, и при написании программы на основе экспертной системы, которая объединит в себе множество алгоритмов и фактов о работе методов, а также вводные данные. Это уменьшит число ошибок, совершаемых человеком. Экспертная система способна объединить в себе скорость решения проблемы и высокую точность, ведь алгоритмы, на которых строится программа экспертной системы, не пропустят неточности из-за человеческого фактора. По этой особенности можно сравнить потенциальные возможности работы экспертной системы с уже внедренными и функционирующими стационарными системами мониторинга технических средств автоматизации на железнодорожном транспорте [13, 15]. Количество ошибок, допускаемых людьми, можно снизить только благодаря проверке расчетов.

Однако полностью заменять человека не обязательно: необходимы обслуживание и проверка точности работы программы. Следует объединить работу программы на основе экспертной системы и эксперта, который станет дополнительной ступенью проверки расчетов процессов принятия решений. Такой комплексный способ работы существенно снизит количество отказов и повысит безопасность — а значит, поможет решить одну из важнейших проблем на железной дороге.

## Библиографический список

1. Бруяка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А. Инженерный анализ в SNSYS Workbench: Учебное пособие. — Самара: СамГУ, 2010. — 271 с.
2. Bernard B. Munyazikwiye, Hamid R. Karimi, Kjell G. Robbersmyr Fuzzy logic approach to predict vehicle crash severity from acceleration data, 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), 18–20 Nov. 2015 Yilan, Taiwan. DOI: 10.1109/iFUZZY.2015.7391892.
3. Бутырский С. Н., Сорокин П. А. Оптимизация режима технического диагностирования металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. — С. 41–52.

4. *O.N. Kuzyakov, M. A. Andreeva.* Increasing accuracy of three-dimensional displacement control system applying fuzzy logic theory, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3–4 Oct. 2018 Vladivostok, Russia DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602490.
5. *Сорокин П.А., Селиверстов Г. В., Колясников А. А.* Способ автоматизированной диагностики металлоконструкций грузоподъемных кранов // Автоматизация и современные технологии. — 2001. — № 1. — С. 5–7.
6. *M. Babita, J. Amit, M. B. Srinivas.* A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 21–24 April 2008 Beijing, China DOI: 10.1109/CMD.2008.4580217.
7. *D. E. Tamir, H. N. Teodorescu, M. Last, A. Kandel.* Discrete complex fuzzy logic, 2012 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 6–8 Aug. 2012 Berkeley, CA, USA DOI: 10.1109/NAFIPS.2012.6291020.
8. *Болотова Л. С.* Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник/ ФГБОУ ВПО РГУИТП; ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». — М.: Финансы и статистика, 2012. — 664 с.
9. *Сорокин П. А., Селиверстов Г. В., Бутырский С. Н.* Патент РФ 23556034. МПК 7 G01 N21/88. Способ диагностики трещинообразования в металлоконструкциях / Опубл. 2009. Бюл. № 14.
10. *Гарипов В. С., Горелов С. Н., Веккер П. И., Никитенко К. С.* Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и канатов навесного самоподъемного крана // Строительная механика и расчет сооружений. — 2015. — № 4. — С. 4–11.
11. *Joseph C. Giarratano, Gary D. Riley.* Expert Systems: Principles and Programming, Edition 4th: Course Technology; 4 edition. — 288 с.
12. *C.S. Krishnamoorthy, S. Rajeev.* Artificial Intelligence and Expert Systems for engineers (New Directions in Civil Engineering) 1st Edition. — Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. — 320 p.
13. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 171 с.
14. *Лошкарев И. Ю., Чернышов А. С.* Неразрушающий контроль. Особенности методов неразрушающего контроля. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Под редакцией А. В. Павлова. — Саратов, 2013. — С. 184–186.
15. *Гроссе К. У.* Неразрушающий контроль и технология мониторинга технического состояния конструкций при контроле качества и надзоре за объектами строительства // Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. АлитИнформ. — Санкт-Петербург, 2012. — С. 62–77.
16. *Гончаров Б. Э.* Метод неразрушающего контроля. Акустико-эмиссионный контроль. Научная перспектива. — Уфа: Инфинити, 2016. — С. 132–133.
17. *Величко Е.И., Приходько М. Г., Нижник А. Е.* Контроль сварных соединений методами неразрушающего контроля. Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КУБГТУ». — Краснодар: КУБГТУ, 2016. — С. 57–66.
18. *Мозгачев А. В., Рыбина Г. В., Шанцер Д. И., Блохин Ю. М.* Динамические интеллектуальные системы на основе интегрированных экспертных систем. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — М.: «Научтехлитиздат», 2012. — С. 13–20.

19. Громов Ю. Ю., Аль-Тамими Н. Ю., Иванова О. Г., Родин В. В. Некоторые аспекты построения экспертной системы оценки устойчивости сетевых информационных систем. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — М.: «Научтехлитиздат», 2011. — С. 43–46.
20. Ручкин В. В., Романчук В. А., Фулин В. А., Пролыгина А. А. Экспертная система нечеткой кластеризации нейропроцессорных систем, Известия ТулГУ. Технические науки. — Тула: ТулГУ, 2014. — С. 162–167.

### **Yu. V. Alevetdinova**

*Department of «Land Transport and Technological Machines»,  
Russian University of Transport, Moscow*

### **TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEM OF ROLLING STOCK UNIT METALWORK**

The article is devoted to the study of diagnostic methods used in the dynamic operation of road construction machines. It describes existing methods that can further be used to create an expert diagnostics system. The intelligent systems' diagnostic methods (mainly non-destructive testing methods) considered in the article can improve the accuracy of diagnosing and predicting the metalwork condition.

The service life of metalwork depends on many factors, such as force impacts, load dynamics, environmental corrosive power, high temperature effects, etc. It is possible to extend the service life of products by increasing the accuracy and timeliness of diagnosis. The article discusses the expert system architecture visually showing the relationship between the subsystem and dynamically changing system properties. The proposed architecture allows for the most comprehensive analysis of complex technical systems' behavior, as well as for the prompt expert decisions. An integrated approach is suggested in the operation of expert systems where preference is given to theoretical, most often mathematical methods that are more generalized and less related to the subject area. Also, the author introduced a mathematical model that reflects the logic of the expert system decisions.

expert system, dynamics, non-destructive testing, synergistic approach, self-awareness, prediction, fuzzy logic

### **References**

1. Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., & Glazunova N. A. (2010) Inzhenernyy analiz v SNSYS Workbench [Engineering analysis in SNSYS Workbench]. Uchebnoye posobiye [Training manual]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 271 p. (In Russian)
2. Bernard B. Munyazikwiye, Hamid R. Karimi & Kjell G. Robbersmyr (2015) Fuzzy logic approach to predict vehicle crash severity from acceleration data, 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), 18–20 Nov. 2015. Yilan, Taiwan. DOI: 10.1109/iFUZZY.2015.7391892
3. Butyrskiy S. N. & Sorokin P. A. (2012) Optimizatsiya rezhima tekhnicheskogo diagnostirovaniya metallokonstruktsiy gruzopod'yemnykh mashin [Optimization of the technical diagnostic mode for hoisting machines metalwork]. *Bulletin of the Tula State University [Izvestiya TulGU]. Technical sciences.* Tula, TSU Publ., iss. 10, pp. 41–52. (In Russian)

4. *Kuzyakov O. N. & Andreeva M. A.* (2018) Increasing accuracy of three-dimensional displacement control system applying fuzzy logic theory, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 3–4 Oct. 2018. Vladivostok, Russia. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602490
5. *Sorokin P. A., Seliverstov G. V. & Kolyasnikov A. A.* (2001) Sposob avtomatizirovannoy diagnostiki metallokonstruktsiy gruzopod'yemnykh kranov [A method for automated diagnostics of hoisting cranes metalwork]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii [Automation and Modern Technology]*, no. 1, pp. 5–7. (In Russian)
6. *Babita M., Amit J. & Srinivas M. B.* (2008) A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 21–24 April 2008 Beijing, China. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580217
7. *Tamir D. E., Teodorescu H. N., Last M. & Kandel A.* (2012) Discrete complex fuzzy logic, 2012 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 6–8 Aug. 2012 Berkeley, CA, USA. DOI: 10.1109/NAFIPS.2012.6291020
8. *Bolotova L. S.* (2012) Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii osnovannyye na znaniyakh [Artificial intelligence systems: knowledge-based models and technologies]. Textbook. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Russian State University of Innovative Technologies and Entrepreneurship (RGUITP); Federal State Institution “Research Institute of Information Technologies and Telecommunications” (GNII ITT Informika). Moscow, Finansy i statistika Publ., pp. 267–302. (In Russian)
9. *Sorokin P. A., Seliverstov G. V. & Butyrskiy S. N.* (2009) RF Patent 23556034. IPC7 G01 no. 21/88. Sposob diagnostiki treshchinoobrazovaniya v metallokonstruktsiyakh [A method for diagnosing crack formation in metalwork]. Publ. in 2009. Bul. no. 14. (In Russian)
10. *Garipov V. S., Gorelov S. N., Vekker P. I. & Nikitenko K. S.* (2015) Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy i kanatov navesnogo samopod'yemnogo krana [Analysis of the stress-strain state of metal structures and ropes of a mounted self-elevating crane]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and structural analysis]*, no. 4, pp. 4–11. (In Russian)
11. *Joseph C. Giarratano & Gary D. Riley.* Expert Systems: Principles and Programming, Edition 4th: Course Technology; 4 edition. 288 p.
12. *Krishnamoorthy C. S. & Rajeev S.* (1996) Artificial Intelligence and Expert Systems for engineers (New Directions in Civil Engineering) 1st Edition. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2018, 320 p.
13. *Efanov D. V.* (2016) Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices: monograph]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 171, pp. (In Russian)
14. *Loshkarev I. Yu. & Chernyshov A. S.* (2013) Nerazrushayushchiy kontrol'. Osobennosti metodov nerazrushayushchego kontrolya. Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Non-destructive testing. Specific features of non-destructive testing methods. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Edited by A. V. Pavlov. Saratov, pp. 184–186. (In Russian)
15. *Grosse C. U.* (2012) Non-destructive testing and technology for monitoring the technical condition of structures for quality control and supervision of construction sites. *Alitinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures*. St. Petersburg, ALITinform Publ., pp. 62–77. (In Russian)
16. *Goncharov B. E.* (2016) Metod nerazrushayushchego kontrolya. Akustiko-emissionnyy kontrol' [Non-destructive testing method. Acoustic emission testing]. *Nauchnaya perspektiva [The scientific perspective]*. Ufa, Infinity Publ., p. 132–133. (In Russian)

17. *Velichko E. I., Prikhod'ko M. G. & Nizhnik A. E.* (2016) Kontrol' svarynykh soyedineniy metodami nerazrushayushchego kontrolya [Testing of welded joints by NDT methods]. *Nauchnyye trudy KubGTU [KubSTU Research papers]*. Krasnodar, KubSTU Publ., pp. 57–66. (In Russian)
18. *Mozgachev A. V., Rybina G. V., Shantser D. I. & Blokhin Yu. M.* (2012) Dinamicheskiye intellektual'nyye sistemy na osnove integrirovannykh ekspertnykh sistem. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika [Dynamic intelligent systems based on integrated expert systems. Devices and systems. Management, control, diagnostics]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., pp. 13–20. (In Russian)
19. *Gromov Yu. Yu., Al'-Tamimi N. Yu., Ivanova O. G. & Rodin V. V.* (2011) Nekotoryye aspekty postroyeniya ekspertnoy sistemy otsenki ustoychivosti setevykh informatsionnykh sistem. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika [Certain aspects of building an expert system for assessing the stability of network information systems. Devices and systems. Management, control, diagnostics]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., pp. 43–46. (In Russian)
20. *Ruchkin V. V., Romanchuk V. A., Fulin V. A. & Prolygina A. A.* (2014) Ekspertnaya sistema nechetkoy klasterizatsii neyroprotsessornykh sistem [Expert system of fuzzy clustering of neuroprocessor systems]. *News of the Tula State University [Izvestiya TulGU]*. Tula, TSU Publ., pp. 162–167. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым  
Поступила в редакцию 06.06.2019, принята к публикации 30.08.2019*

*АЛЕВЕТДИНОВА Юлия Викторовна* — ассистент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта;  
e-mail: [yulialevetdinova@gmail.com](mailto:yulialevetdinova@gmail.com)

© Алеветдинова Ю. В., 2020

УДК 656.22

**Т. А. Искаков**

**А. И. Сафронов, канд. техн. наук**

**В. Г. Сидоренко, д-р техн. наук**

**М. А. Чжо, канд. техн. наук**

*Кафедра «Управление и защита информации»,  
Российский университет транспорта, Москва*

## **ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

В статье проанализированы способы оценки качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена и их связь с этапами жизненного цикла планового графика движения. Рассмотрены варианты описания результатов планирования движения поездов метрополитена, показана связь выбора одного из них с содержанием решаемых задач управления. Выявлены параметры планового графика движения, влияющие на его устойчивость в «большом» и «малом» и качество управления в соответствии с критериями качества и целями управления. Проведен анализ результатов применения ортогональных преобразований к разным моделям планового графика движения. Предлагаемая авторами оценка качества с использованием ортогональных преобразований показала свою эффективность для оценки равномерности движения и соблюдения заданной парности движения. Такой способ представления информации может служить промежуточным вариантом между развернутым и «трудным для обзора одним взглядом» способом классического представления результатов планирования движения пассажирских поездов метрополитена и сильно сжатым и усредненным описанием при помощи эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества.

метрополитен, устойчивость, плановый график движения, дискретное преобразование Фурье, спектр

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63

### **Введение**

При проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на транспорте особое внимание уделяется работоспособности системы при повышенных нагрузках, а также способности сохранять штатный режим работы при воздействии возмущающих факторов и восстанавливать штатный режим после прекращения воздействия таких факторов, т. е. устойчивости системы и качества управления [1]. В различных отраслях знаний и экономики существуют разнообразные, хотя и родственные определения понятия устойчивости, методы ее оценки

и классификации. Данная статья посвящена вопросам оценки устойчивости систем управления движением пассажирских поездов метрополитена и качества управления в них.

Результатом планирования функционирования транспортной системы является плановый график движения (ПГД), например, пассажирских поездов метрополитена (ППМ) [2], который является основой управления движением. Применительно к ПГД под устойчивостью (в отличие от понятия устойчивости, в частности, по Ляпунову) будем понимать возможность восстановления движения в соответствии с ПГД, выполнения требований графика оборота (ГО) электроподвижного состава (ЭПС) и ночной расстановки составов после ликвидации причины сбоя.

Рассмотрим понятие устойчивости в «малом» и «большом» применительно к процессам планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена. Устойчивым режимом работы в «малом» называют такой режим, при котором незначительное отклонение от исходного равновесного состояния со временем уменьшается и система возвращается в равновесное состояние. Под устойчивым режимом работы в «большом» подразумевают такой режим, при котором система, получив достаточно большое начальное возмущающее воздействие и имея значительное отклонение от исходного равновесного состояния, возвращается в него после прекращения действия возмущения. Устойчивость ПГД в «малом» и в «большом» можно рассмотреть с точки зрения классификации сбоев в движении поездов. Выделяют малые и большие сбои [3–7]. Малыми называют сбои, которые приводят к таким отклонениям от ПГД, компенсация которых производится только за счет изменения длительности стоянки поездов на станциях и времен прохождения перегонов. Под большими сбоями понимаются ситуации, при которых вышеперечисленных мер недостаточно для восстановления движения по ПГД, поэтому производятся внеплановые обороты составов на станциях с путевым развитием и (при необходимости) внеплановое удаление составов с линии в депо.

## 1. Методы оценки качества ПГД

Методы определения устойчивости различаются в зависимости от типа системы [8]. Транспортные системы, в частности метрополитены, являются сложными нелинейными нестационарными системами. Единых аналитических подходов к оценке устойчивости системы для них не существует; как правило, используется имитационное моделирование [3–5, 9, 10]. Имитационное моделирование позволяет учесть максимальное количество факторов, влияющих на управление движением поездов на линии метрополитена. В работе [9] представлены принципы построения, основные достоинства и свойства многофункциональных комплексных моделей систем управления. Эффективность этих моделей заключается в возможности сравнения и выбора различных технических и технологических решений на стадии формирования технического

задания с целью выбора лучшего решения на базе проведения имитационных экспериментов. Подобные модели являются основой таких средств автоматизации управления движением поездов метрополитена, как:

- автоматизированная система оперативного диспетчерского управления движением поездов [5, 11, 12];
- тренажер поездного диспетчера линии метрополитена [13, 14];
- автоматизированная система энергооптимальных тяговых расчетов [15–18];
- автоматизированная система построения ПГД ППМ [19–25];
- автоматизированная система оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии [16, 26] и др.

Оценка устойчивости при помощи имитационного моделирования совмещается или предваряется численной оценкой качества ПГД по тем критериям, которые оказываются значимыми при воздействии возмущающих факторов [5, 27, 28].

В статье предложен еще один способ оценки качества ПГД с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и вейвлет-анализа [29], который расширяет возможности автоматизированного предварительного анализа качества результатов построения ПГД и ГО и способствует улучшению результатов их эксплуатации.

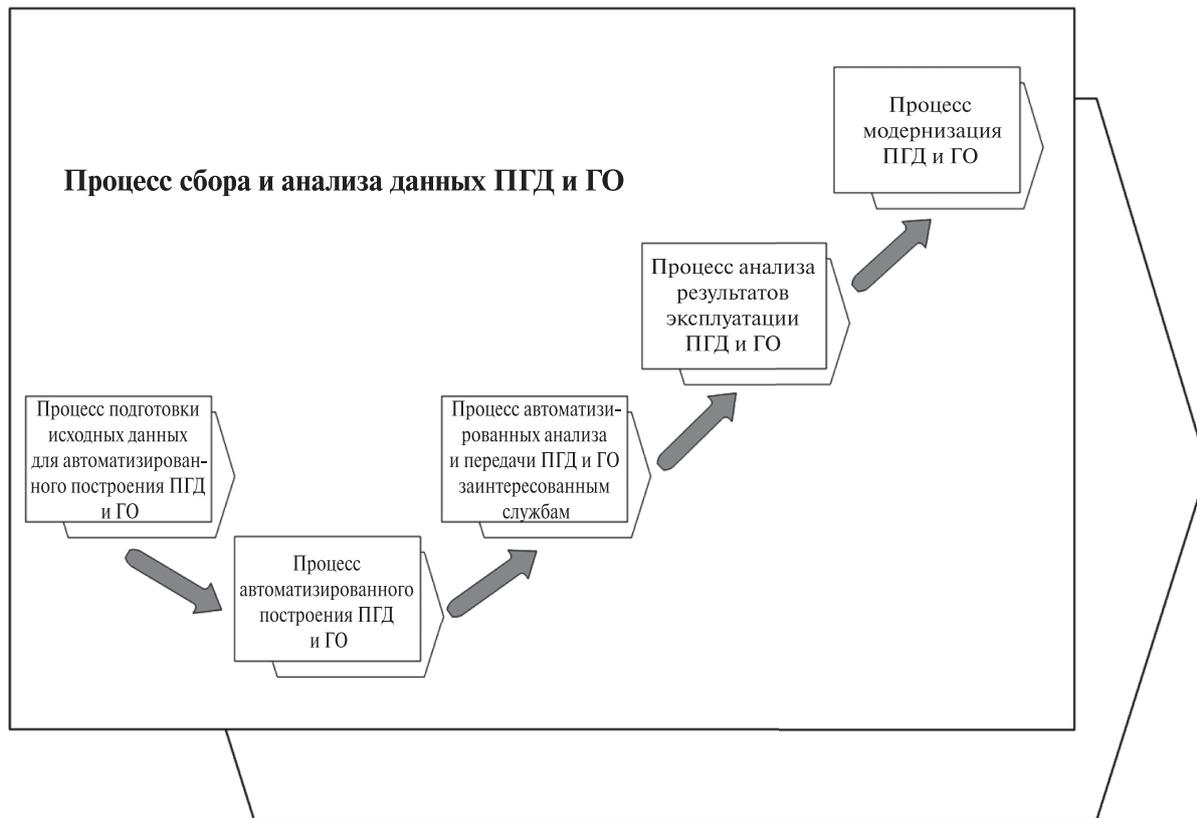
Выбор того или иного способа оценки устойчивости и качества ПГД зависит от целей и имеющихся инструментов такой оценки, способен влиять на качество принимаемых управленческих решений. Степень сжатия информации и форма представления может находиться в противоречии с ее полнотой, качеством и удобством для восприятия и использования. Следовательно, необходимо соблюдать баланс между размерностью информации и уровнем ее качества.

ПГД, как и любой продукт, имеет жизненный цикл, *V*-образная модель которого представлена на рисунке 1.

На каждом этапе жизненного цикла возможны свои подходы к оценке качества ПГД.

При подготовке исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО проводится проверка условий реализуемости ПГД с заданными параметрами, например:

- наличие в необходимом количестве ЭПС и достаточной пропускной способности всех участков линии для обеспечения заданной максимальной плотности движения при заданном времени хода по линии метрополитена. В случае невыполнения этого условия применяются средства, позволяющие парировать данное возмущение, в частности введение графика зонного типа (ГЗТ) [30];
- наличие в достаточном количестве ресурсов для выполнения требований ГО ЭПС [31];
- равномерность пассажиропотока на всех участках линии. На конечных участках линии метрополитена пассажиропоток может быть гораздо меньше,



**Рис. 1.** V-образная модель жизненного цикла ПГД и ГО

чем на центральном, либо может наблюдаться значительное увеличение пассажиропотока на некотором участке линии при проведении крупномасштабного культурно-массового мероприятия [10, 30, 32]. В этих случаях анализируется необходимость и возможность поддержания одинаковой парности на всем протяжении линии и рациональность введения ГЗТ.

В ходе автоматизированного построения ПГД и ГО проверяется выполнение условий реализуемости и реализации каждого процесса ПГД, успешной реализации ПГД в целом, вычисляются значения критериев равномерности ввода/снятия составов, интервалов движения, равномерности проведения осмотров и ремонтов ЭПС [28, 31].

В ходе автоматизированного анализа и передачи ПГД и ГО заинтересованным службам после успешного построения ПГД и ГО проводится расчет эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества для ПГД. На данном этапе эффективно применение имитационного моделирования для анализа устойчивости ПГД к различным возмущающим факторам [5, 9, 27, 28].

Предлагаемая авторами оценка качества ПГД с использованием ДПФ и вейвлет-анализа может показать свою эффективность на этом и последующих этапах для оценки равномерности и соблюдения заданной парности движения.

Одновременно такой способ представления информации, на взгляд авторов, является компромиссом между развернутым и «трудным для обзора одним взглядом» способом классического представления ПГД и сильно сжатым и усредненным описанием при помощи эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества. Этот способ может оказаться перспективным при построении интеллектуальных централизованных систем управления, т. к. синтез законов управления, ими реализуемых, как правило, включает в себя анализ системы в частотной области [1, 4, 8].

Анализ результатов эксплуатации ПГД и ГО предусматривает сравнение ПГД и ГИД, вычисление значений эксплуатационных измерителей для ГИД и сравнение с плановыми значениями [5].

При модернизации ПГД и ГО эффективно использовать имитационное моделирование для предварительной оценки влияния предложенных решений по модернизации ПГД на его устойчивость.

## 2. Формализованное описание ПГД

Рассмотрим математическую формализацию ПГД, применимую как для описания замкнутых систем централизованного автоматического управления движением поездов метрополитена, так и для использования ДПФ и вейвлет-анализа с целью оценки качества планирования и управления движением [4, 28].

Движение маршрутов (маршрут  $\tilde{n}$  — это состав с присвоенным ему на сутки номером, который определяет его движение в соответствии с ПГД и ГО) по линии метрополитена, включая нахождение в депо, пунктах осмотра и отстоя, точках ночной расстановки, может быть однозначно описано множеством  $Y$ , которое включает в себя зависимости кортежей фазовых переменных от времени для всех маршрутов:

$$Y = \left\{ \left( p_i(t), x_i(t), v_i(t), m_i(t) \right), i = 1, 2, \dots, N_c \right\}, \quad (1)$$

где  $p_i$  — целочисленная переменная, обозначающая путь, на котором находится  $i$ -й маршрут;  $x_i$  — смещение местоположения  $i$ -го маршрута относительно начала отсчета на пути  $p_i$ ;  $v_i$  — скорость движения  $i$ -го маршрута;  $m_i$  — лингвистическая переменная, обозначающая состояние  $i$ -го маршрута;  $N$  — число маршрутов.

Существуют следующие состояния маршрутов  $c$ , осуществляющих движение по главным путям станции.

- При нахождении на главных путях:
  - движение по главным путям станции ( $LD$ );
  - стоянка на станции;
    - ◆ плановая стоянка для посадки и высадки пассажиров ( $LO$ );
    - ◆ сверхрежимная выдержка на станции ( $LOS$ );
    - ◆ ночная расстановка ( $LN$ ).
- При нахождении на станционных путях или в депо:
  - движение ( $SD, DD$ );
  - стоянка не на станции:

- ◆ регулировочный отстой ( $SO, DO$ );
- ◆ ремонт  $j$ -го типа ( $SR_j, DR_j$ );
- ◆ ночная расстановка ( $SN, DN$ ).

Таким образом, ПГД может быть отображен  $N_c$  траекториями в пятимерном пространстве  $(t, p, x, v, m)$ .

Представить результаты синтеза ПГД в форме, удобной для планирования движения и управления как отдельно взятым составом (на основе расписания движения), так и всей совокупностью составов на линии (на основе ПГД), позволяющей формализовать критерии качества графика, можно используя понятия элемента расписания, нитки и ремонта [28]. Такая форма описания ПГД является обратной к исходной. Независимая переменная «время» (прибытия или отправления) становится значением функции, зависящим от независимой переменной «номер поезда» или «номер маршрута» при фиксированных значениях  $p$  и  $x$ , задающих местоположение конкретной точки линии, например точки остановки головы состава на платформе станции или у точки ночной расстановки составов. Этот способ формализации задачи автоматизированного построения ПГД показал свою обоснованность для описания ПГД, поскольку он учитывает связи объектов линии друг с другом и возможность изменения количества составов на линии. Он использован для расчета значений критериев равномерности, формализации условий реализуемости и реализации построения процессов ПГД, а также ввода иных математических соотношений, на которых основываются разработанные сценарии построения процессов ПГД. Эта форма описания иллюстрируется классическим графическим представлением ПГД (рис. 2).

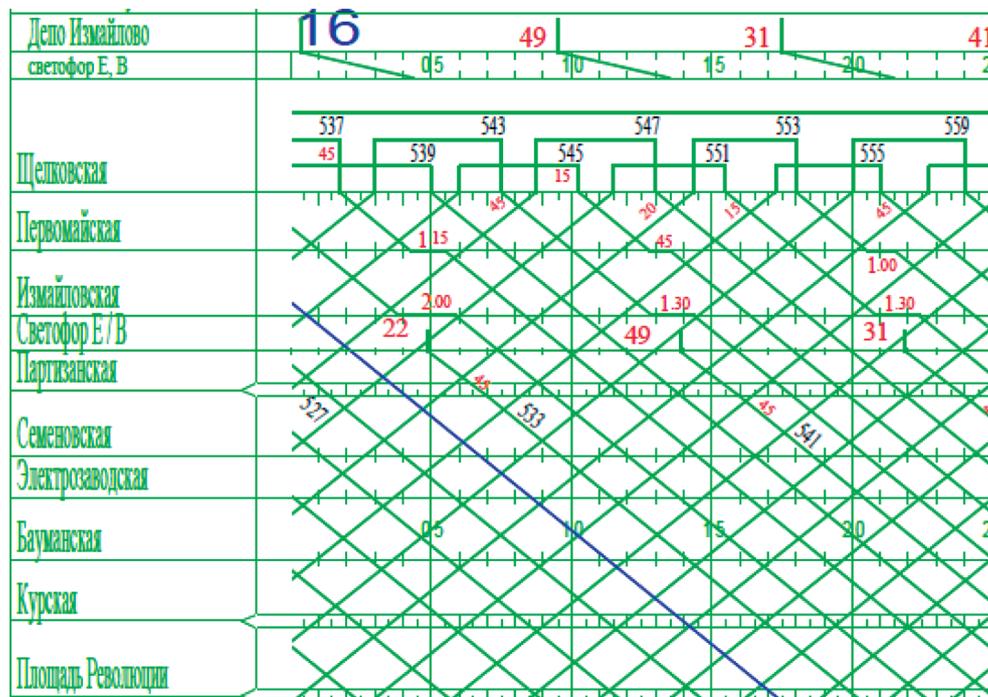


Рис. 2. Фрагмент ПГД

Если ставится задача описать процесс управления поездом метрополитена с использованием терминов классической теории управления, удобно в качестве независимой переменной снова взять время и уменьшить размерность пространства. Предложенная в данной работе формализация позволяет от описания с использованием четырех функций перейти к описанию с использованием двух функций времени.

На рисунке 3 представлены варианты модели движения поездов через платформу:  $s = f(p, x)$ . Факт нахождения поезда на платформе индицируется в виде импульсов, где ширина импульса  $T_s$  — длительность стоянки поезда на станции, интервал времени между моментами начала соседних импульсов  $T_a$  — интервал движения по прибытию. Соответственно, интервал времени между моментами окончания соседних импульсов  $T_d$  — интервал движения по отправлению. Это функция дискретного времени  $c[s, t]$ , в которой отсчеты заданы с шагом дискретизации 5 секунд. Высота импульса на рисунке 3 равна номеру маршрута, прибывшего на платформу. На рисунке 4 высота импульса равна единице, т. е. просто индицирует факт нахождения состава на платформе. К варианту  $tr[s, t]$ , представленному на рисунке 4, удобно применять ДПФ, чтобы получить спектр сигналов для каждой станции.

Для полного описания движения вводится вторая функция  $m[s, t]$ , отражающая зависимость направления движения поезда, прибывшего на платформу, от времени. В этом случае по оси ординат откладываются числовые эквиваленты лингвистических переменных  $m_i$ .

Предложенная авторами модель описания ПГД может найти применение при построении структуры и алгоритмов централизованных систем автоматического управления движением поездов метрополитена (ЦСАУДПМ). Эти системы

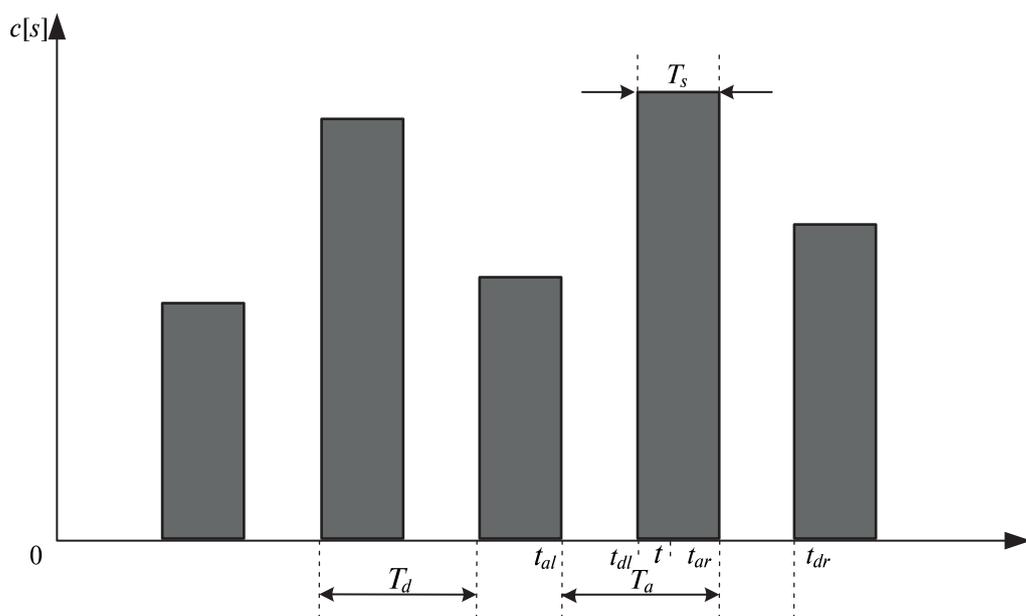


Рис. 3. Иллюстрация модели движения маршрутов через платформу

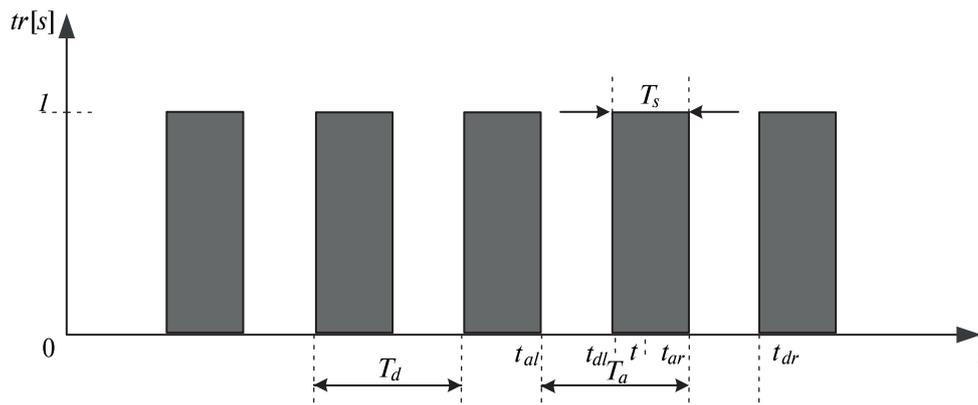


Рис. 4. Иллюстрация модели движения составов через платформу

реализуют интервальные и графичево-интервальные алгоритмы управления [4, 5, 9, 10], которые, в отличие от графиковых алгоритмов, реализуют обратную связь и формируют команду на отправление маршрута со станции на основе информации, получаемой из ПГД, о плановых направлениях движения и местоположениях поездов и из автоматизированных систем считывания номеров поездов о реальном местоположении поездов. Это нашло отражение на структурной схеме, представленной на рисунке 5.

Одновременно такой способ описания ПГД удобен при организации работы устройств системы маршрутно-релейной централизации (МРЦ) по подготовке

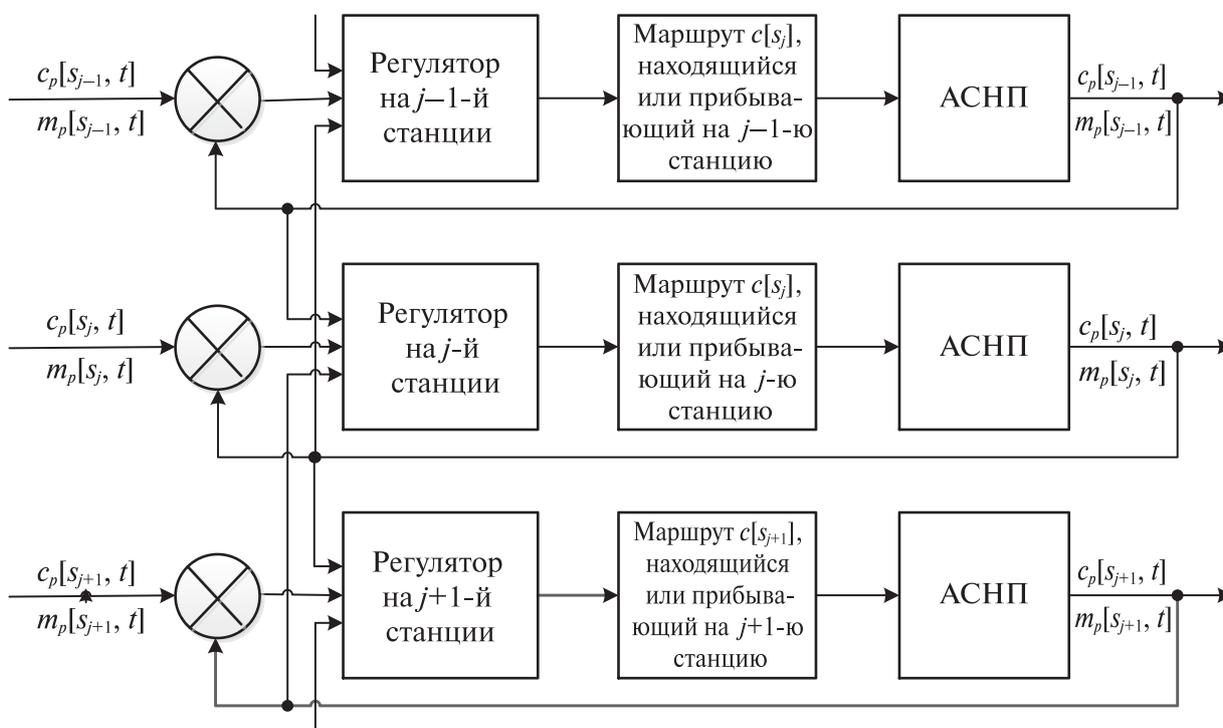


Рис. 5 Структурная схема ЦСАУДПМ

пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД в автоматическом режиме. Он устанавливает жесткое соответствие между элементами ПГД и работой устройств МРЦ [2, 32–36], т. к. последовательности задания маршрутов системы МРЦ и авторежимов  $a[s, t]$ , собираемых на станции  $s$ , являются последовательностью значений функционалов  $F_r$  и  $F_a$ , примененных к функции  $m[s, t]$  на некотором промежутке времени:

$$r[s, t] = F_r(m[s, \tau], t_{al} \leq \tau \leq t_{ar}), \quad (2)$$

$$a[s, t] = F_a(m[s, \tau], r[s, t], a[s, \tau], t_{dl} \leq \tau \leq t_{dr}), \quad (3)$$

где  $t_{al}$  — момент времени, в который происходит ближайший слева к моменту времени  $t$  переход функции  $m[s, \tau]$  из ненулевого состояния в нулевое ( $t_{al} | [(m[s, t_{al}^-] > 0) \text{ and } (m[s, t_{al}^+] = 0)]$ ) (рис. 3, 4);  $t_{ar}$  — момент времени, в который происходит ближайший справа к моменту времени  $t$  переход функции  $m[s, \tau]$  из ненулевого состояния в нулевое ( $t_{ar} | [(m[s, t_{ar}^-] > 0) \text{ and } (m[s, t_{ar}^+] = 0)]$ );  $t_{dl}$  — момент времени, в который происходит ближайший слева к моменту времени  $t$  переход функции  $m[s, \tau]$  из нулевого состояния в ненулевое ( $[t_{dl} | (m[s, t_{dl}^-] = 0) \text{ and } (m[s, t_{dl}^+] > 0)]$ );  $t_{dr}$  — момент времени, в который происходит ближайший справа к моменту времени  $t$  переход функции  $m[s, \tau]$  из нулевого состояния в ненулевое ( $t_{dr} | [(m[s, t_{dr}^-] = 0) \text{ and } (m[s, t_{dr}^+] > 0)]$ ).

### 3. Параметры ПГД, влияющие на его устойчивость

При планировании движения ППМ выделяются следующие цели управления [4, 5, 27, 28, 38, 39]:

- реализация заданной (изменяющейся во времени) парности движения в течение всего времени движения пассажирских поездов;
- правильность ночной расстановки (все маршруты должны завершить свое движение в тех точках ночной расстановки, из которых на следующий день начинается движение следующих маршрутов, до заданного момента времени или за минимальное время после завершения пассажирского движения);
- реализация ГО.

Поставленные цели определяют перечень рассчитываемых эксплуатационных показателей и интегральных показателей качества.

К эксплуатационным измерителям относятся: количество поездов, поездо-километры, вагоно-километры, нулевой пробег, вагоно-километры нулевого пробега, пробег с нулевым, поездо-часы в движении, простой, поездо-часы, эксплуатационная скорость, техническая скорость, количество задействованных в ПГД составов.

Для оценки факторов, влияющих на устойчивость ПГД, могут использоваться следующие интегральные показатели:

- количество разменов маршрутов через депо;
- параметры регулировочных отстоев на станционных путях линии (количество, общая (суммарная), средняя, максимальная длительности и другие параметры регулировочных отстоев);
- время завершения движения по каждому из главных путей;
- параметры ГЗТ или ввода/снятия составов на промежуточных станциях;
- параметры станционных оборотов составов на конечных и промежуточных станциях;
- параметры ГО, а именно интервалы времени между осмотрами и их продолжительность.

Показатели качества, связанные с регулировочными отстоями и разменами, определяют степень свободы поездного диспетчера при выборе управленческих решений. Чем больше разменов и их длительность, тем меньшей свободой обладает поездной диспетчер для назначения маневровых передвижений (оборотов составов на промежуточных станциях), которые составляют основу управления в случае «больших» сбоев [3, 5, 33].

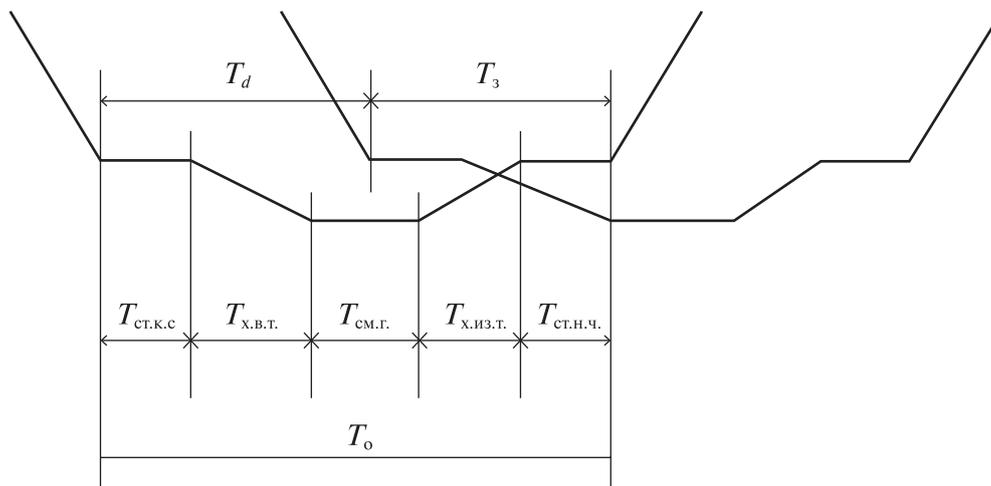
Параметры ГЗТ и станционных оборотов, а также параметры ГО определяют запас устойчивости ПГД, т. е. склонность движения поездов по линии к отклонению от ПГД даже при очень малых возмущениях, вызванных:

- различием длительностей стоянки поезда на станции для полного освобождения состава от пассажиров и стоянки поезда на обычной промежуточной станции, а также посадки пассажиров в пустой состав;
- невыполнением ограничения на величину «захлеста»  $T_3$  — интервала времени между моментами отправления поезда с начальной станции пути или после оборота на промежуточной станции и прибытия на другую платформу той же станции маршрута, который будет отправляться следующим после оборота. Это ограничение можно выразить следующим образом (рис. 6):

$$\begin{aligned} T_0^{\min} \leq T_0, \quad T_3 \leq T_3^{\max}, \quad T_0 = T_3 + T_d, \\ T_0^{\min} \leq T_3 + T_d, \quad T_0^{\min} - T_d \leq T_3 \leq T_3^{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $T_0$  — длительность станционного оборота с одного пути станции на другой;  $T_0^{\min}$  — минимальное время станционного оборота на заданной станции при заданном числе локомотивных бригад, участвующих в организации работы станции с путевым развитием;  $T_3^{\max}$  — максимальная длительность «захлеста».

При наличии отклонений в ПГД оперативное управление линией должно осуществляться с учетом ограничений на управление в зависимости от состояния системы [5]. Для этого необходимо определить пропускную способность участков линии метрополитена между двумя соседними станциями с путевым развитием. Пропускная способность участка линии метрополитена позволяет



**Рис. 6.** Организация оборота составов на станциях с путевым развитием ( $T_{ст.к.с.}$  — время стоянки на конечной станции пути, по которому двигался маршрут до оборота;  $T_{х.в.т.}$  — время хода в тупик;  $T_{см.г.}$  — время смены головы;  $T_{х.из.т.}$  — время хода из тупика;  $T_{ст.н.ч.}$  — время стоянки на начальной станции пути, по которому будет двигаться маршрут после оборота)

определить такое максимально допустимое число поездов на этом участке, при котором все поезда на участке будут всегда следовать на разрешающие показания светофоров. Имеются следующие ограничения на управление:

- минимальный интервал движения по отправлению;
- минимальное время хода по перегону, которое определяется характеристиками перегона (планом, профилем, допустимыми скоростями) и подвижного состава;
- минимальное время стоянки поезда на станции, которое определяется необходимым временем для высадки пассажиров на станции.

Решение этой задачи возможно путем проведения имитационных экспериментов [5, 40]. Оно позволяет найти грань между устойчивостью ПГД «в малом» и «в большом».

Существуют алгоритмы управления [3–5, 10, 26], помогающие эффективно восстановить устойчивость при малых сбоях и довольно быстро войти в график при небольших отклонениях от ПГД. Однако при больших сбоях они неэффективны из-за ограниченности ресурса нагона или отставания от ПГД (факторы, позволяющие восстановить устойчивость ПГД «в малом»). Эти факторы можно рассматривать как некий аналог «запаса по устойчивости». Они определяются суммированием ресурса уменьшения (увеличения) длительности стоянок поездов на станциях и ресурсов уменьшения (увеличения) времени хода по перегону. Для повышения устойчивости ПГД к воздействию возмущающих факторов необходимо выполнять распределение времени хода по линии на время хода по перегонам с учетом необходимости наличия ресурсов нагона или отставания. Выбор того или иного способа управления зависит от величины рассогласования ПГД и графика исполненного движения (ГИД).

Анализ статистики показывает, что большинство сбоев в движении поездов метрополитена связано с возмущениями, вызванными пассажирами [4, 10, 32], поэтому столь большое значение при планировании движения поездов уделяется планированию длительности стоянок поездов на станциях.

ГИД позволяет оценить качество управления движением поездов метрополитена и устойчивости ПГД к воздействию возмущающих факторов. По этому документу определяются фактические значения парности и интервалов движения, критериев качества и эксплуатационных измерителей. Если в графике присутствует сбой, дополнительно оцениваются [7]:

— отставание поездов от планового времени прибытия и отправления с конечных станций линии:

- время опоздания;
- количество опоздавших поездов;

— факт и длительность стоянок поездов с пассажирами на перегоне (количество остановок по сигналам систем интервального регулирования движения поездов);

— реализация графика:

- количество отмененных поездных ниток;
- процент выполнения графика движения поездов или коэффициент реализации графика (отношение количества фактических прибытий поездов на станции к количеству плановых прибытий на станции);

— равномерность движения поездов при управлении в случае сбоя (отсутствие резкого изменения интервалов движения):

• коэффициент реализации заданных интервалов движения по прибытию (отношение среднего планового интервала движения по прибытию и среднего фактического интервала движения по прибытию);

• коэффициент реализации заданных интервалов движения по отправлению (отношение среднего планового интервала движения по отправлению и среднего фактического интервала движения по отправлению);

— время восстановления графика (с момента ликвидации причины сбоя до возвращения последнего поезда в график) — время вхождения в график.

#### **4. Оценка качества ПГД с использованием ортогональных преобразований**

В ходе исследования проводилось сравнение результатов применения различных ортогональных преобразований к моделям, описанным в пункте 2 этой статьи и проиллюстрированным рисунком 4, «эталонного» (построенного строго по заданным размерам движения с постоянной длительностью стоянки поездов на станциях) и реального ПГД ППМ для некоторых линий Московского метрополитена.

В ходе анализа результатов применения ДПФ к этим двум моделям сделаны следующие выводы.

Спектр «эталонного» ПГД ППМ содержит ярко выраженные максимумы, соответствующие заданным размерам движения (рис. 7, *a* и 8, *a*). Амплитуда этих максимумов определяется суммарной длительностью интервалов времени в течение дня, на которых поддерживается одна и та же парность движения. В связи с тем, что в выходные дни максимальная для этих дней парность движения (для рассматриваемых графиков это 22 пары в час, при этой парности интервал движения поездов равен 165 с) поддерживается на протяжении более продолжительного времени, чем в рабочие дни; максимумы, соответствующие этим парностям, выше, чем в рабочие дни.

Спектр реального ПГД ППМ также содержит выраженные максимумы, соответствующие заданным размерам движения (рис. 7, *б* и 8, *б*), но их амплитуда значительно ниже. Это связано с отклонением плановых интервалов движения от заданных, характерным для переходных процессов ПГД. Значения амплитуд спектра реального ПГД на частотах, которым соответствуют нулевые значения амплитуд на спектре «эталонного» ПГД, могут быть отличны от нуля, т. е. наблюдается размытие спектра ПГД. На ПГД на рабочие дни это явление выражено ярче, чем на ПГД на выходные дни. Это связано с тем, что в рабочие дни переходные процессы ПГД имеют большую продолжительность [2, 28].

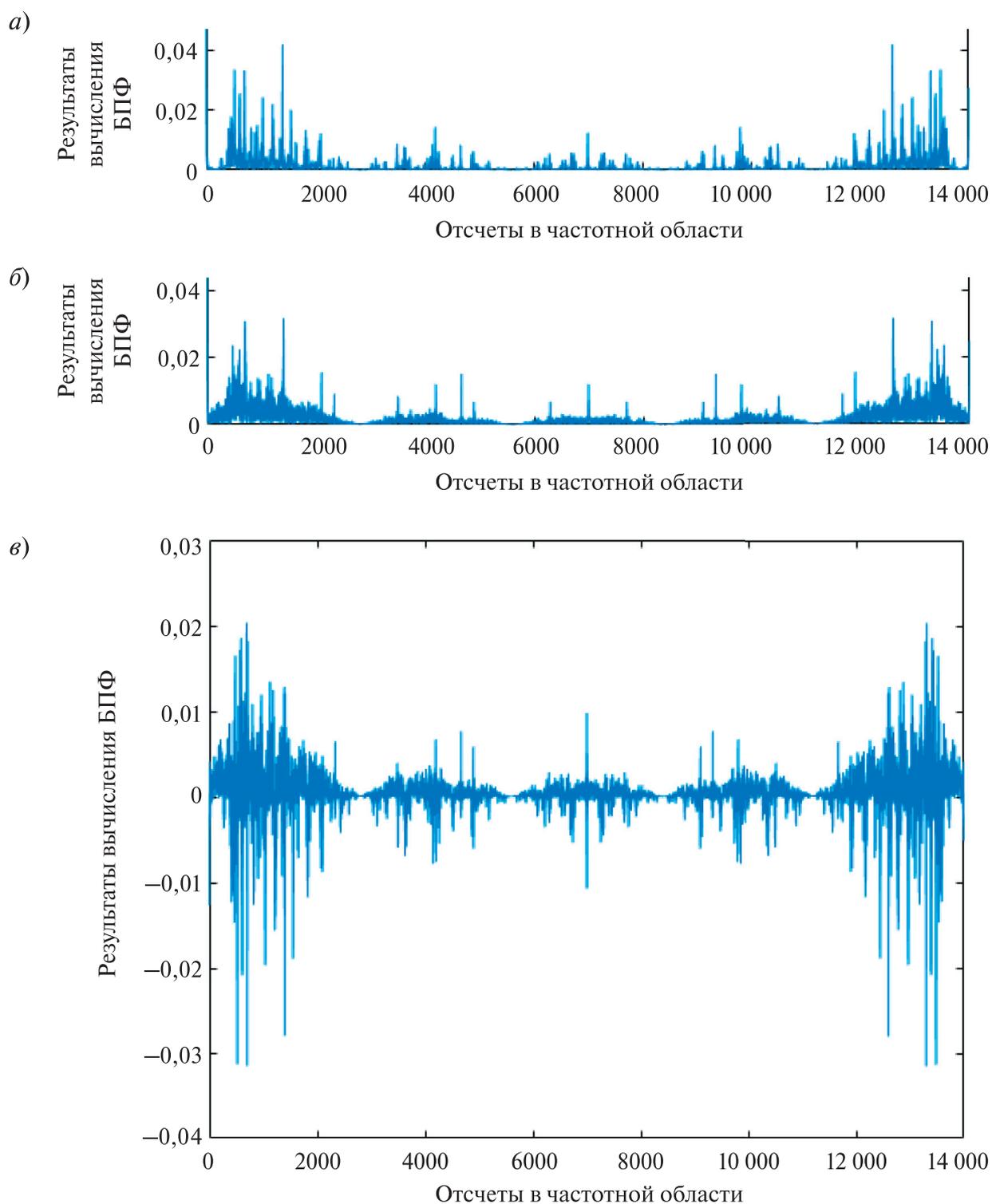
В некоторых случаях максимумы могут перемещаться на соседние частоты. Это объясняется тем, что заданная парность движения реализуется не всегда при постоянном интервале движения поездов, соответствующем этой парности, а путем варьирования различных интервалов движения (рис. 7, *в* и 8, *в*).

Аналогичный эффект размытия получается, если в «эталонный» ПГД внести случайную составляющую, выраженную в отклонении интервала движения от заданного (рис. 9).

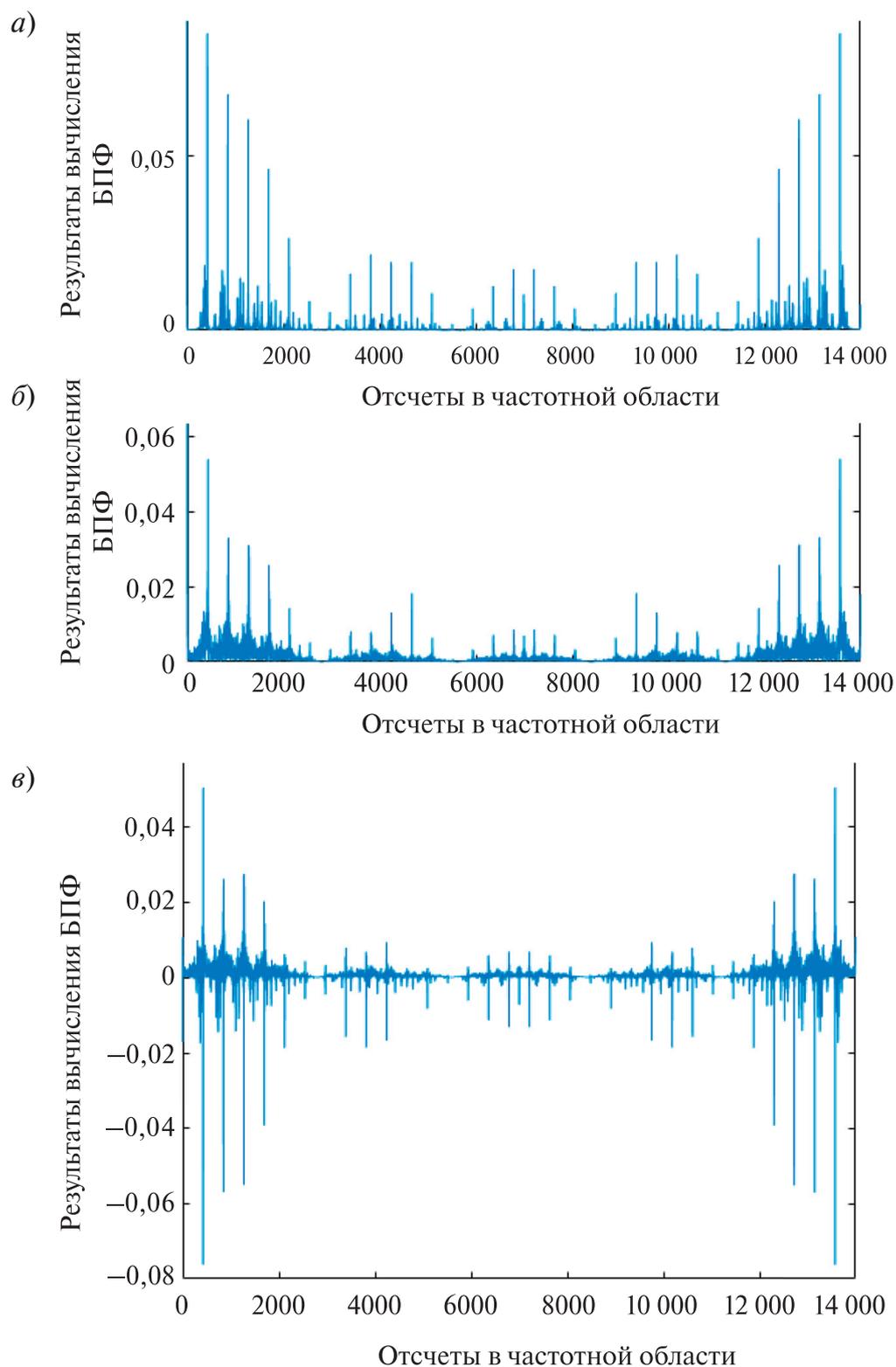
Огибающая спектров как «эталонного», так и реального ПГД близка по форме к функции отсчетов, параметры которой определяются плановой длительностью стоянки на станциях (для рассматриваемых графиков это 25 с). Степень этой близости различается в зависимости от количества сверхрежимных выдержек, предусмотренных ПГД. Поэтому ближе всего по форме к функции отсчетов спектры «эталонных» ПГД, затем — реального ПГД на выходные дни. Удаленность огибающей спектра реального ПГД на рабочие дни от функции отсчетов также выражается в его размытии.

Интерес представляют результаты анализа спектров реальных ПГД ППМ по отдельным станциям линии. Этот анализ позволяет классифицировать станции по степени изменения интервала движения.

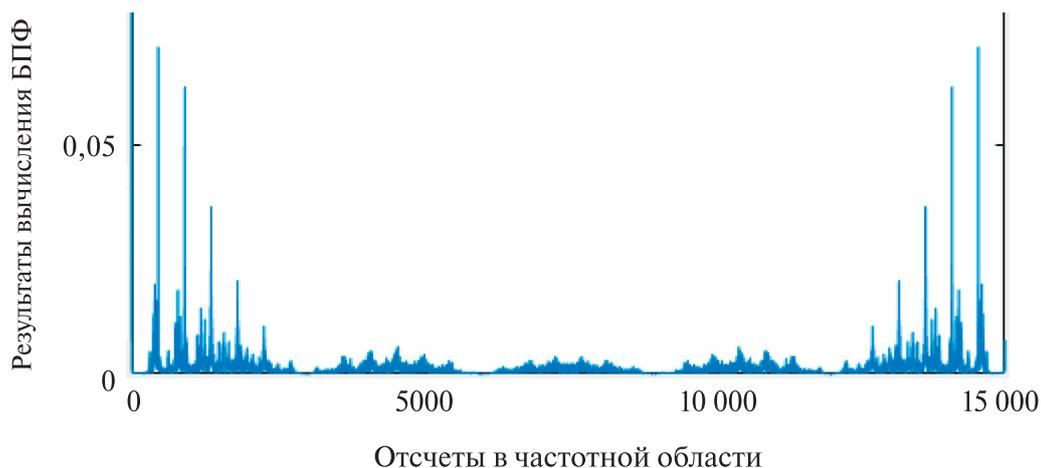
Станции, предшествующие станциям массового ввода/снятия составов и следующие за ними, характеризуются наименьшим соблюдением заданного интервала движения, т. е. большим размытием спектра. Это связано с необходимостью выполнения сверхрежимных выдержек для обеспечения максимальной равномерности движения на станциях ввода/снятия составов (рис. 10, *a*). Большое размытие спектра, а значит, сильное изменение интервалов движения и слабое соблюдение заданного характерно для начальных станций линий, если станции массового ввода/снятия составов удалены от них (рис. 10, *б*).



**Рис. 7.** Сравнение спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (а — спектр «эталонного» ПГД ППМ, б — спектр реального ПГД ППМ, в — разность спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ)



**Рис. 8.** Сравнение спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на выходные дни (а — спектр «эталонного» ПГД ППМ, б — спектр реального ПГД ППМ, в — разность спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ)



**Рис. 9.** Спектр «эталонного» ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на выходные дни с добавлением равномерно распределенной аддитивной помехи к заданному интервалу движения, максимальное значение которой составляет 2 % от величины планового

Малым размытием спектра ПГД отличаются станции массового ввода/снятия составов (рис. 10, в) и станции между ними (рис. 10, г), для которых, как правило, характерен максимальный пассажиропоток.

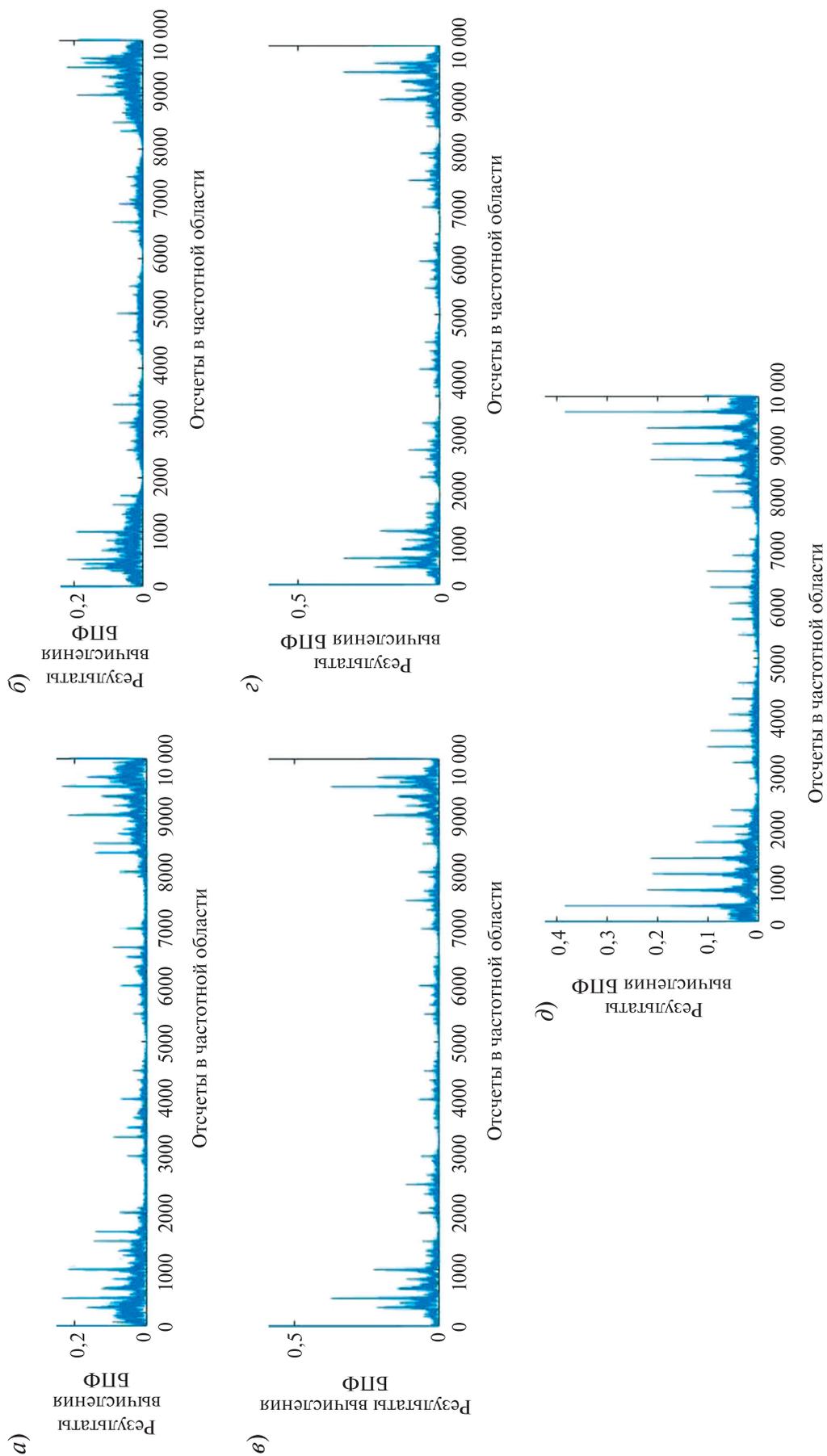
В выходные дни на всех станциях лучше соблюдается заданный интервал движения, т. е. количество вводимых/снимаемых составов влияет на соблюдение заданного интервала движения (рис. 10, д).

Различие станций по плановой длительности стоянки также отражают анализируемые спектры по величине «периодов» огибающих: 20 с — четыре «периода» на протяжении вычисляемого ДПФ для функции дискретного времени с периодом дискретизации 5 с, 25 с — пять «периодов», 30 с — шесть «периодов» (рис. 10).

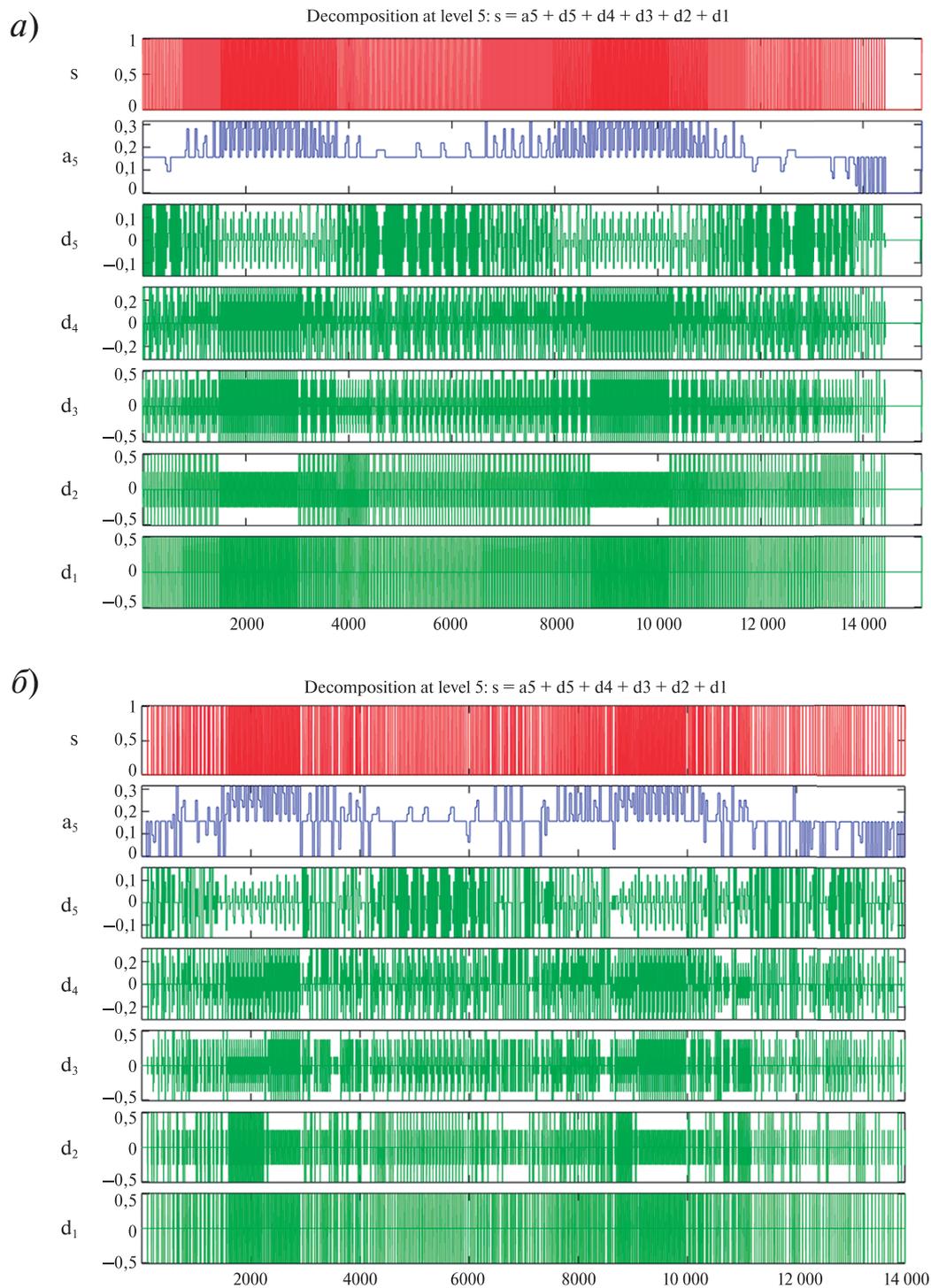
Использование для анализа ПГД вейвлет-функций позволяет не только выявить факты отклонения интервалов движения от заданных размеров движения и узнать, с какими интервалами на самом деле выполняется движение, но и в сжатой форме точно указать временные моменты, в которые эти отклонения встречаются чаще всего (рис. 11).

## Заключение

Рассмотренная в статье формализация описания ПГД позволяет интегрировать решение задач управления движением ППМ и оценить ее свойства с этой точки зрения. Работа содержит пример эффективного применения данной формализации для решения одной из важнейших задач, стоящих перед ЦСА-УДПМ, — автоматизации организации работы устройств системы МРЦ по подготовке пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД.



**Рис. 10.** Спектры фрагментов ПГД ППМ для станций Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (а – «Красносельская», длительность стоянки 20 с; б – «Бульвар Рокоссовского», длительность стоянки 25 с; в – «Комсомольская», длительность стоянки 30 с; г – «Библиотека имени Ленина», длительность стоянки 30 с) и на выходные дни (д – «Красносельская», длительность стоянки 20 с)



**Рис. 11.** Результаты применения вейвлет-преобразования к ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (*a* — к «эталонному» ПГД ППМ, *б* — к реальному ПГД ППМ)

Авторы вводят понятие устойчивости ПГД в «малом» и «большом». Выявлены параметры, оказывающие влияние на это свойство. Определены факторы, воздействующие на свойство системы городского рельсового транспорта, аналогичное такому свойству системы управления, как устойчивость.

Предложенный авторами способ анализа ПГД ППМ с использованием ортогональных преобразований расширяет возможности автоматизированного предварительного анализа качества результатов его автоматизированного построения, а значит:

- способствует улучшению результатов его эксплуатации;
- позволяет
  - определить интервалы времени, в которые отклонения интервалов движения от заданных размеров движения превышают пороговые значения;
  - представить соответствующую информацию в сжатой форме;
  - выполнить классификацию ПГД и объектов линии метрополитена с точки зрения равномерности движения поездов.

Научная новизна полученных результатов состоит в:

- выполнении формализации описания ПГД, которая позволяет реализовать решение задач управления движением ППМ с использованием единого информационного и понятийного пространства, способствует автоматизации их решения;
- применении понятия устойчивости к ПГД и определении ее показателей;
- расширении множества ортогональных преобразований, используемых для анализа ПГД ППМ по сравнению с ранее известным;
- вводе понятия «эталонного» ПГД с точки зрения равномерности движения поездов.

Перспективные пути дальнейших исследований связаны с:

- внедрением полученных результатов в интеллектуальные системы планирования и управления движением ППМ;
- расширением базы знаний этих систем вновь разработанными алгоритмами управления и оценки качества управления на базе введенных формализации и показателей качества;
- распространением исследований на все этапы жизненного цикла ПГД ППМ;
- развитием формального описания организации работы устройств системы МРЦ по подготовке пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД на базе введенной формализации.

### **Библиографический список**

1. *Солодовников В. В.* Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова. — М.: Машиностроение, 1967. — 771 с.

2. *Бакулин А. С.* Организация движения поездов и работа станций метрополитена. / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров, К. И. Кудринская. — М.: Транспорт, 1981. — 230 с.
3. *Ерофеев Е. В.* Алгоритм восстановления графика движения после сбоя. / Е. В. Ерофеев, В. П. Козлов // Вестник ВНИИЖТ. — 1988. — № 1. — С. 7–14.
4. *Баранов Л. А.* Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов; Под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
5. *Баранов Л. А.* Алгоритмы для поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Мир транспорта. — 2007. — № 2. — С. 104–113.
6. *Wegele, S.* Comparing the effectiveness of two real-time train rescheduling systems in the case of perturbed traffic conditions / S. Wegele, F. Corman, A. D'Ariano // Timetable Planning and Information Quality: WIT Press. — 2010. — С. 189–199.
7. *Pellegrini P.* Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions / P. Pellegrini, G. Marlière, J. Rodriguez // Transport Res B-Meth. — 2014. — № 59. — С. 58–80.
8. *Чезари Л.* Асимптотическое поведение и устойчивость решений обыкновенных дифференциальных уравнений / Л. Чезари — М.: Мир, 1964. — 478 с.
9. *Балакина Е. П.* Многофункциональные модели систем управления / Е. П. Балакина, Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. Г. Сидоренко // Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2012. — № 2. — С. 79–82.
10. *Баранов Л. А.* Метрополитен Мехико: алгоритмы движения. / Л. А. Баранов, П. Воробьев // Мир транспорта — 2012. — № 4. — С. 106–113.
11. *Rudan J.* Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling / J. Rudan, B. Kersbergen, T. van den Boom, K. Hangos // In proceedings of Control Conference (ECC). — 2013. — С. 4562–4567.
12. *Albrecht A. R.* Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search / A. R. Albrecht, D. M. Pantan, D. H. Lee // Computers and Operations Research. — 2013. — № 40. — С. 703–712.
13. *Баранов Л. А.* Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Железные дороги мира. — 2002. — № 8. — С. 64–69.
14. *Логинава Л. Н.* Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л. Н. Логинава // Наука и техника транспорта. — 2011. — № 1. — С. 62–65.
15. *Баранов Л. А.* Внедрение энергосберегающих технологий / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин // Мир транспорта. — 2010. — Vol. 31. — № 3. — С. 3–8.
16. *Баранов Л. А.* Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена / Л. А. Баранов, М. А. Васильева, А. В. Ершов, В. М. Максимов, И. С. Мелешин // Вестник МИИТа. — М.: МИИТ. — 2008. — № 19. — С. 3–10.
17. *Моисеев А. А.* Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги / А. А. Моисеев // Межвузовский сб. науч. тр. — М.: МИИТ, 1989. — № 811. — С. 15–19.
18. *Hu H.* A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving / H. Hu, K. Li, X. Xu // Journal of Modern Transportation. — 2013. — № 21. — С. 9–16.

19. Чжо М. А. Применение теории графов к планированию движения поездов метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // V Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование — ИСУЖТ-2016». — М.: НИИАС, 2016. — С. 131–134.
20. Тишкин Е. М. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена / Е. М. Тишкин, А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1989. — № 2. — С. 8–9.
21. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции «Транспорт XXI век». Варшава. 2001. — С. 24–34.
22. Christian S. Railway scheduling problems and their decomposition / S. Christian // Osnabruck, 2007. — 123 с.
23. Bruker P. Scheduling Algorithms / P. Bruker // Leipzig: Springer, 2007. — 371 с.
24. Zhao J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. — 2009. — № 223. — С. 533–541.
25. Mišauskaitė. Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automati-zavimas, Rototechnika/ Mišauskaitė // Electronic and electrical engineering. — 2006. — Vol. 125. — № 7(71). — С. 43–46.
26. Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–41.
27. Воробьева Л. Н. Методика учета временных ограничений скорости в графике движения поездов метрополитена / Л. Н. Воробьева, А. В. Ершов, В. Г. Сидоренко // «Соискатель» — приложение к журналу «Мир транспорта». — 2005. — № 2. — С. 86–92.
28. Сафронов А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир транспорта. — 2010. — № 3. — С. 98–105.
29. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 560 с.
30. Сидоренко В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. — 2010. — № 4. — С. 128–134.
31. Чжо М. А. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, В. М. Алексеев, Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский // Электротехника. — 2017. — № 12. — С. 73–76.
32. Искаков Т. А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортного узла / Т. А. Искаков // Наука и техника транспорта. — М., 2016. — № 3. — С. 79–89.
33. Сидоренко В. Г. Система поддержки принятия решения поездного диспетчера метрополитена / В. Г. Сидоренко // Датчики и системы управления. — 2001. — № 10. — С. 21–26.
34. Palte M. H. A. Smartfleet, how “smart” rail vehicles help improve business / M. H. A. Palte // 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011). — 2011. — С. 1–4.
35. Noah J. G. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes / J. G. Noah // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2014. — № 2424. — С. 58–65.

36. *Forsgren M.* Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making / M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg // *Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press. — 2012. — С. 439–450.
37. *Sauder R. L.* Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization / R. L. Sauder, W. M. Westerman // *Interfaces*. — 1983. — Vol. 6. — № 13. — С. 24–37.
38. *Зенченко В. А.* Обоснование выбора совокупности показателей для оценки трафика движения автотранспортных средств / В. А. Зенченко, А. Н. Ременцов, А. В. Павлов, А. В. Сотсков // *Грузовик*. — М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2012. — Выпуск 5 — С. 38–43.
39. *Айриев Р. С.* Показатели качества транспортного обслуживания населения / Р. С. Айриев, М. А. Кудряшов // *Мир транспорта*. — 2018. — № 4. — С. 140–145.
40. *Калиев Ж. Ж., Мелешин И. С., Шабданов Д. Т.* Модули и алгоритмы автоведения / Ж. Ж. Калиев, И. С. Мелешин, Д. Т. Шабданов // *Мир транспорта*. — 2010. — № 3. — С. 138–144.

**T. A. Iskhakov**

**A. I. Safronov**

**V. G. Sidorenko**

**M. A. Chzho**

*Department of "Information Management and Security",  
Russian University of Transport, Moscow*

## **APPROACHES TO QUALITY ASSESSMENT OF SUBWAY TRAFFIC PLANNING AND MANAGEMENT**

Quality assessment methods for subway traffic planning and management were analyzed as well as the connection of the above-mentioned with lifecycle phases of the projected traffic schedule. Versions for description of subway traffic planning results were considered, the connection of choosing one of them with the content of current control tasks was demonstrated. The parameters of the projected traffic schedule were determined influencing its stability in the "big" and "small" as well as the control quality in accordance with performance criteria and control objectives. The effect analysis of applying orthogonal transformations to different models of the projected traffic schedule was conducted. The quality assessment with the use of orthogonal transformations proposed by the authors showed its efficiency in evaluation of traffic steadiness as well as compliance with the fixed paired movement. The given method of presenting data may be used as an intermediate option of the extended and "complicated from the viewpoint of a one-sided survey" method for traditional data presentation of subway traffic planning results on the one hand and extremely concise average description by means of operating measuring instruments and integrated performance indices on the other.

subway, stability, planned traffic schedule, discrete Fourier transform, spectrum

### **References**

1. *Solodovnikov V. V.* (1967) *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya*. Kniga 1. Matematicheskoye opisaniye, analiz ustoichivosty i kachestva system avtomaticheskogo regulirovaniya [Engineering cybernetics. Automatic control

- theory. Volume 1. Mathematical formulation, quality and stability analysis of automatic control systems]. Edited by V. V. Solodovnikov. Moscow, Mashinostroeniye [Mechanical engineering] Publ., 771 p. (In Russian)
2. *Bakulin A. S., Pronin V. A., Fedorov E. A. & Kudrinskaya K. I.* (1981) Organizatsiya dvizheniya poezdov i rabota stantsiy metropolitena [Operation of trains and activity of subway stations]. Moscow, Transport Publ., 230 p. (In Russian)
  3. *Erofeyev E. V. & Kozlov V. P.* (1998) Algoritm vosstanovleniya grafika dvizheniya posle sboya [Schedule recovery algorithm after failure]. *Vestnik VNIIZhT [Proceedings of All-Russian Research Institute of Railway Transport]*, no. 1, pp. 7–14. (In Russian)
  4. *Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeyev E. V. & Maksimov V. M.* (1990) Mikoroprotsessorniye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor-based systems of automatic operation of the electric motive power]. Edited by L. A. Baranov. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
  5. *Baranov L. A., Balakina E. P. & Vorobyeva L. N.* (2007) Algoritmy dlya poezdov metropolitena [Algorithms for subway trains]. *Mir transporta [The world of transport]*, no. 2, pp. 104–113. (In Russian)
  6. *Wegele S., Corman F. & D'Ariano A.* (2010) Comparing the effectiveness of two real-time train rescheduling systems in the case of perturbed traffic conditions. *Timetable Planning and Information Quality: WIT Press*, pp. 189–199.
  7. *Pellegrini P., Marlière G. & Rodriguez J.* (2014) Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions. *Transport Res B-Meth*, no. 59, pp. 58–80.
  8. *Chezari L.* (1964) Asimptoticheskoye povedeniye i ustoichivost resheniy obyknovennykh differentsialnykh uravneniy [Asymptotical behavior and solution stability of ordinary differential equations]. Moscow, Mir [World] Publ., 478 p. (In Russian)
  9. *Balakina E. P., Baranov L. A., Erofeyev E. V. & Sidorenko V. G.* (2012) Mnogofunktionalniye modely system upravleniya [Multifunctional models of operation systems]. *Problemy poligrafii i izdatelskogo dela [Problems of polygraphy and publishing]*, no. 2, pp. 79–82. (In Russian)
  10. *Baranov L. A. & Vorobyev P.* (2012) Metropolitен Mekhiko: algoritmy dvizheniya [The subway of Mexico City: algorithms of traffic]. *Mir transporta [The world of transport]*, no. 4, pp. 106–113. (In Russian)
  11. *Rudan J., Kersbergen B., T. van den Boom & Hangos K.* (2013) Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling. *In proceedings of Control Conference (ECC)*, pp. 4562–4567.
  12. *Albrecht A. R., Panton D. M. & Lee D. H.* Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search. *Computers and Operations Research*, no. 40, pp. 703–712.
  13. *Baranov L. A. & Sidorenko V. G.* (2002) Trenazher poezdnykh dispetcherov linii Moskovskogo metropolitena [Training simulator for traffic controllers of Moscow tube lines]. *Zheleznnye dorogi mira [Railroads of the world]*, no. 8, pp. 64–69. (In Russian)
  14. *Loginova L. N.* (2011) Rol sistemy avtomatizirovannoy proverky znaniy poezdnykh dispetcherov linii metropolitena v povyshenii kachestva obucheniya [The role of automated knowledge assessment system for traffic controllers of subway lines in improvement of education quality]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]*, no. 1, pp. 62–65. (In Russian)
  15. *Baranov L. A., Gaev D. V., Ershov A. V., Grechishnikov V. A. & Shevlyugin M. V.* (2010) Vnedreniye energosberegayushchikh tekhnologiy [Adoption of energy-efficient technologies]. *Mir transporta [The world of transport]*, vol. 31, no. 3, pp. 3–8. (In Russian)

16. Baranov L. A., Vasilieva M. A., Ershov A. V., Maksimov V. M. & Meleshin I. S. (2008) Avtomatizirovannaya sistema vybora energooptimalnykh rezhimov upravleniya dvizheniyem poezda metropolitena [Automated systems of power-optimum mode selection for traffic operation of subway trains]. *Vestnik MIITa* [Proceedings of the Russian University of Transport]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., no. 19, pp. 3–10. (In Russian)
17. Moiseev A. A. (1989) Energetichesky optimalnoye upravleniye dvizheniyem podvizhnogo sostava s diskretnym regulirovaniyem sily tyagy [Power optimum operation control of the rolling stock with discrete adjustment of traction effort]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Interuniversity collection of research papers]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., no. 811, pp. 15–19. (In Russian)
18. Hu H., Li K. & Xu X. (2013) A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving. *Journal of Modern Transportation*, no. 21, pp. 9–16.
19. Chzho M. A. & Sidorenko V. G. (2016) Primeneniye teorii grafov k planirovaniyu dvizheniya poezdov metropolitena. V Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Intellektualniye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Kompyuternoye i matematicheskoye modelirovaniye — ISUZhT-2016” [Application of the theory of graphs for subway traffic planning. The 5<sup>th</sup> International scientific and technical conference “Intelligent railway operation systems. Computer and mathematical simulation — ISUZhT-2016”]. Moscow, NIIAS [Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation of the Ministry of Railways of the Russian Federation] Publ., pp. 131–134. (In Russian)
20. Tishkin E. M. & Feofilov A. N. (1989) Avtomatizirovanniy raschet grafikov dvizheniya poezdov metropolitena [Computerized analysis of the subway train schedule]. *Vestnik VNIIZhT* [Proceedings of All-Russian Research Institute of Railway Transport], no. 2, pp. 8–9. (In Russian)
21. Vasilenko M. N., Degtyarev D. P. & Maksimenko O. A. (2001) Avtomaticheskoye postroeniye grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene [Computerized graph plotting for subway train schedule]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii “Transport XXI vek”* [Proceedings of the International Conference “Transport the 21<sup>st</sup> century”]. Warsaw, pp. 24–34. (In Russian)
22. Christian S. (2007) Railway scheduling problems and their decomposition. Osnabruck, 123 p.
23. Bruker P. Scheduling Algorithms. Leipzig, Springer Publ., 2007, 371 p.
24. Zhao J., Chan A. H. C. & Burrow M. P. N. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components. *Rail Rapid Transit*, 2009, no. 223, pp. 533–541.
25. Mišauskaitė (2006). Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automatizavimas, Rototechnika. *Electronic and electrical engineering*, vol. 125, no. 7(71), pp. 43–46.
26. Baranov L. A., Bestemyanov P. F., Sidorenko V. G. & Shcherbina E. G. (2013) Metod otsenky izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Evaluation method for electromagnetic environment change in areas of collision avoidance systems functioning]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], no. 3, pp. 35–41. (In Russian)

27. Vorobyeva L. N., Ershov A. V. & Sidorenko V. G. (2005) Metodika ucheta vremennykh ogranicheniy skorosty v grafike dvizheniya poezdov metropolitena. [Method of accounting temporal speed limitations in subway train traffic schedule]. "Soiskatel" — prilozheniya k zhurnalu "Mir transporta" ["Applicant" — supplement for "The world of transport"], no. 2, pp. 86–92. (In Russian)
28. Safronov A. I. & Sidorenko V. G. (2010) Postroeniye planovogo grafika dvizheniya metropolitena [Scheduling of the subway train traffic]. *Mir transporta* [The world of transport], no. 3, pp. 98–105. (In Russian)
29. Smolentsev N. K. (2019) Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB [Foundations of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB]. Moscow, DMK Press, 560 p. (In Russian)
30. Sidorenko V. G. & Novikova M. V. (2010) Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa [Design of the projected regional-type traffic schedule]. *Mir transporta* [The world of transport], no. 4, pp. 128–134. (In Russian)
31. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Alekseev V. M., Rozenberg E. N. & Umanskiy V. I. (2017) Planirovaniye obsluzhivaniya elektropodvizhnogo sostava v usloviyakh ogranichennykh resursov [The locomotive maintenance planning under the conditions of limited resources]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], no. 12, pp. 73–76. (In Russian)
32. Iskhakov T. A. (2016) Model povedeniya razlichnykh klientskikh grupp v sisteme upravleniya transportnogo uzla [A behavior model of diverse client groups in the transport nodal point control system]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. Moscow, no. 3, pp. 79–89. (In Russian)
33. Sidorenko V. G. (2001) Sistema podderzhky prinyatiya resheniya poezdnoy dispetchera metropolitena [Decision support system for the subway traffic controller]. *Datchiki i sistemy upravleniya* [Sensing elements and control systems], no. 10, pp. 21–26. (In Russian)
34. Palte M. H. A. (2011) Smartfleet, how "smart" rail vehicles help improve business. *5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011)*, pp. 1–4.
35. Noah J. G. (2014) Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2424, pp. 58–65.
36. Forsgren M., Aronsson M., Gestrelus S. & Dahlberg H. (2012) Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making. *Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press, pp. 439–450.
37. Sauder R. L., Westerman W. M. (1983) Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization. *Interfaces*, vol. 6, no. 13, pp. 24–37.
38. Zenchenko V. A., Rementsov A. N., Pavlov A. V. & Sotskov A. V. (2012) Obosnovaniye vybora sovokupnosti pokazateley dlya otsenki trafika dvizheniya avtotransportnykh sredstv [Rationale for choosing a package of indices for vehicle traffic evaluation]. *Gruzovik [Van]*. Moscow, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., iss. 5, pp. 38–43. (In Russian)
39. Airiev R. S. & Kudryashov M. A. (2018) Pokazately kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya [Quality indices for public transport services]. *Mir transporta* [The world of transport], no. 4, pp. 140–145. (In Russian)
40. Kaliev Zh. Zh., Meleshin I. S. & Shabdanov D. T. (2010) Moduly i algoritmy avtovedeniya [Modules and algorithms of automatic train operation]. *Mir transporta* [The world of transport], no. 3, pp. 138–144. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. А. Барановым  
Поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 21.11.2019*

*ИСКАКОВ Тимур Анвярович* — аспирант кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: tiskakov@yandex.ru

*САФРОНОВ Антон Игоревич* — кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: safronov-ai@mail.ru

*СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна* — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: valenfalk@mail.ru

*ЧЖО Мин Аунг* — кандидат технических наук

e-mail: kyawminaung52@gmail.com

© Искаков Т. А., Сафронов А. И., Сидоренко В. Г., Чжо М. А., 2020

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.5:004.052.32

**Р. Б. Абдуллаев**

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

## ВЕРоятностные характеристики полиномиальных кодов в системах технического диагностирования

В статье рассматриваются вероятностные характеристики некоторых полиномиальных кодов на случай возникновения ошибок в информационных разрядах при безошибочности контрольных разрядов, что актуально для систем технического диагностирования устройств автоматики. Описан метод расчета вероятности необнаруживаемых ошибок данными кодами в зависимости от вероятности необнаружения ошибки в одном информационном разряде. Показано, что с увеличением длины информационного вектора уменьшается доля вероятности возникновения ошибок малых кратностей. Выделены полиномы среди всех полиномов, дающих коды с одинаковым числом контрольных разрядов, с помощью которых строятся коды с наилучшими показателями вероятностных характеристик. Была установлена зависимость вероятности необнаруживаемых ошибок максимальных кратностей при разных показателях безотказной работы диагностируемых схем. Рассчитаны вероятностные характеристики по видам необнаруживаемых ошибок исследуемых полиномиальных кодов. Выделены образующие полиномы, с помощью которых строятся коды, обладающие наименьшими показателями вероятности необнаружения конкретного вида ошибок.

Полиномиальные коды могут быть разделены на классы кодов с постоянным числом контрольных разрядов, следовательно, целесообразно сравнить их по характеристикам обнаружения ошибок с модульными кодами с суммированием, также имеющими постоянное число контрольных разрядов. Для этого были рассчитаны вероятностные характеристики кодов с суммированием и сравнены с характеристиками полиномиальных кодов. Расчеты показали, что даже при различных значениях вероятности искажения одного информационного разряда вероятность появления необнаруживаемых ошибок у полиномиальных кодов намного ниже, чем у кодов с суммированием.

В ходе исследований составлен полный каталог вероятностных характеристик кодов с  $k=2$  и  $k=3$  полиномиальных кодов и кодов с суммированием, который может быть использован при анализе вероятностных характеристик других делимых кодов, применяемых для задач технической диагностики.

функциональное диагностирование; необнаруживаемая ошибка; полиномиальный код; вероятность обнаружения ошибки в информационном векторе кода; вероятностная характеристика полиномиального кода

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-64-88

### Введение

В различных отраслях человеческой жизнедеятельности в сфере автоматизированного и автоматического управления технологическими процессами широко применяются комбинационные логические устройства [1]. Они

функционируют на основе простых логических элементов без памяти и отличаются высокой скоростью обработки сигналов, возможностью реализации широкого спектра задач, низкой себестоимостью по сравнению с другими аналогичными устройствами.

Регулирование движением поездов осуществляют посредством устройств автоматики и телемеханики [2]. На подобные устройства (системы) помимо функции управления движением поездов возложена первоочередная задача — сделать перевозочный процесс безопасным. В воздушной и космической авиации системы автоматики также направлены на обеспечение безопасности полетов и сохранности оборудования летательного аппарата [3]. Следовательно, при использовании комбинационных логических устройств в основе ответственных систем автоматики большое внимание уделяют их надежности.

Для контроля корректности реализуемых комбинационными схемами операций широко применяют методы тестового и функционального диагностирования [4, 5]. Функциональное диагностирование называют еще рабочим диагностированием, т. к. в отличие от тестового при данном методе неисправности обнаруживаются своевременно. Функциональное диагностирование как один из методов технической диагностики применяют и на уровне архитектуры управляющих систем, и при построении систем мониторинга для повышения надежности их функционирования [6]. Использование комбинационных логических устройств со встроенными схемами самоконтроля способствует построению надежных систем.

Зачастую при функциональном диагностировании применяют помехозащищенные коды, позволяющие переводить методы защиты информации в методы обнаружения неисправностей [7–9]. Обнаруживающие характеристики используемого помехоустойчивого кода напрямую определяют характеристики системы функционального контроля по выявлению неисправностей контролируемого устройства. Существует большое количество работ, например [10–14], посвященных синтезу систем функционального диагностирования комбинационных логических устройств с применением различных помехозащищенных кодов, которые обладают разными обнаруживающими характеристиками возникающих ошибок. Различаются подобные коды и по вероятностям возникновения необнаруживаемых ошибок — как по кратностям, так и по видам этих ошибок.

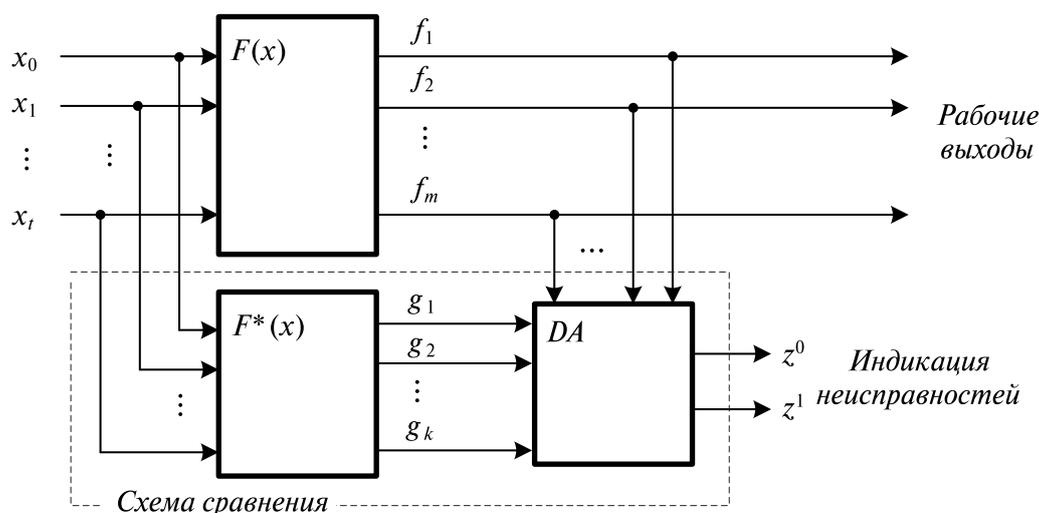
В работах [15–17] изучены полиномиальные коды и показано, что они могут быть намного эффективнее традиционных кодов с суммированием. Следовательно, в данной работе рассматривается задача расчета и анализ показателей вероятности необнаруживаемых ошибок полиномиальных кодов и последующее сравнение полученных характеристик с характеристиками существующих способов кодирования в основе систем функционального контроля, с целью выявления эффективности применения полиномиальных кодов для построения систем диагностирования.

Работа посвящена дальнейшему исследованию полиномиальных кодов в области их применения при построении систем функционального контроля логических устройств. Результаты исследования могут быть смело использованы при анализе свойств любых систем, построенных на любой элементной базе, в основе которых применены полиномиальные коды.

### 1. Использование разделимых двоичных кодов в системах технического диагностирования

Как уже отмечалось, для определения технического состояния устройств и узлов в процессе выполнения своих функций широко используют метод технической диагностики — функциональное диагностирование. Классическим способом использования данного метода является дублирование контролируемых устройств или узлов, а также (при необходимости) системы в целом [4, 7]. При таком подходе (рис. 1) контролируемый блок  $F(x)$ , формирующий рабочие функции  $f_1, f_2, \dots, f_m$ , дополняется схемой сравнения для контроля правильности функционирования. В свою очередь, схема сравнения состоит из аналогичного блоку  $F(x)$  блока  $F^*(x)$ , который вырабатывает контрольные функции  $g_1, g_2, \dots, g_k$ , при этом значения разрядов равны:  $f_1 = g_1, f_2 = g_2, \dots, f_m = g_k$ . Также схема сравнения включает в себя компаратор  $DA$ , осуществляющий поразрядное сравнение парафазных сигналов рабочих и контрольных функций и вырабатывающий соответствующий сигнал индикации  $z^0, z^1$  при их несовпадении, но выходы второго блока предварительно инвертируются и только потом сравниваются в компараторе.

Как видно, в основе такого подхода лежит код с повторением, т. к. контрольный вектор  $\langle g_1 g_2 \dots g_k \rangle$  повторяет информационный  $\langle f_1 f_2 \dots f_m \rangle$  как по длине, так и по значению разрядов. Система функционального диагностирования, построенная по такому способу, имеет большую избыточность.



**Рис. 1.** Метод функционального диагностирования по способу дублирования контролирующего устройства

Методом построения, при котором получаются наименьшие значения показателей структурной избыточности системы функционального диагностирования, является использование кода с защитой по паритету [4, 10]. Низкая структурная избыточность достигается благодаря использованию в данном способе кодирования наименьшей длины контрольного разряда  $k = 1$  при любом значении  $m$ . Чем меньше количество контрольных символов, тем меньше используется число логических элементов для формирования контрольного вектора. Однако такое значение контрольного вектора снижает число обнаруживаемых в объекте диагностирования ошибок. Система функционального диагностирования, построенная с применением кода с защитой по паритету, не обнаруживает большое количество возникающих ошибок.

Помимо описанных подходов, широко применяют способы построения систем функционального контроля с использованием помехозащищенных кодов, при котором значение контрольного вектора колеблется в диапазоне  $1 < k < m$ . Таковы, например, системы, построенные на основе кодов с суммированием [18, 19], обладающие хорошими обнаруживающими характеристиками и небольшими показателями структурной избыточности. И все же небольшая часть ошибок при кодах с суммированием остается необнаруженной.

Одним из перспективных способов построения систем функционального диагностирования выступает метод построения подобных систем на основе полиномиальных кодов, которые обладают хорошими обнаруживающими характеристиками. Изучению свойств полиномиальных кодов в области технической диагностики посвящены работы [15–17], там же выведены закономерности, при которых полиномиальные коды полностью обнаруживают некоторые виды ошибок (симметричные, асимметричные) при значении контрольного вектора  $1 < k < m$ .

Изучим вероятностные характеристики необнаруживаемых ошибок полиномиальных кодов как приложение к синтезу построения дискретных систем с идентификацией неисправностей.

## **2. Определение вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки**

В процессе функционирования контролируемого блока  $F(x)$  (рис. 1) на его выходах возникают ошибки. Они проявляются в виде искажения разрядов рабочих векторов и могут быть одиночными и многократными, а также иметь различные виды (монотонные, симметричные, асимметричные) [20]. В таком случае для определения вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки —  $Q_m$  в контролируемом блоке  $F(x)$  — не будем учитывать специфику этого блока и характер проявления ошибок. Вместо этого допустим, что появление векторов на рабочих выходах равновероятно, а события искажений независимы. Вероятность правильного формирования  $i$ -го разряда на рабочих выходах обозначим как  $p$ .

В [21, 22] приводятся формулы подсчета вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки кратностью  $d$  при некотором значении  $p$ :

$$Q_{m,d} = \beta_{m,d} C_m^d p^{m-d} (1-p)^d, \quad (1)$$

где  $m$  — длина информационного вектора;  $(1-p)^d$  — вероятность одновременного искажения  $d$  разрядов;  $p^{m-d}$  — вероятность отсутствия искажения на  $m-d$  выходах; сомножитель  $\beta_{m,d}$  — доли необнаруживаемых ошибок кратностью  $d$  от общего числа ошибок той же кратности в информационных векторах конкретным помехозащитным кодом; сомножитель  $C_m^d$  — число вариантов искажений кратностью  $d$  в  $m$  разрядах.

Суммируя все значения  $Q_{m,d}$  необнаруживаемых кратностей ошибок полиномиальными кодами  $d \in \{1, 2, \dots, m\}$ , определим значение вероятности возникновения необнаруживаемых ошибок для конкретного помехозащищенного кода:

$$Q_m = \sum_{d \in \{1, 2, \dots, m\}} Q_{m,d}. \quad (2)$$

При анализе выражения (1) нетрудно заметить, что для всех помехозащищенных кодов в этом выражении будет отличаться только значение долей необнаруживаемых ошибок кратностью  $d$  —  $\beta_{m,d}$ . Другими словами, значение данной величины является определяющим в вероятностных характеристиках, тогда как все остальные величины будут стандартными.

Для примера рассчитаем значение  $Q_m$  для полиномиального кода с  $m = 4$  и с образующим полиномом  $x^3 + x + x^0$  (P11) при значении вероятности отсутствия искажения  $i$ -го разряда  $p = 0,9$ . Доли необнаруживаемых ошибок при этом равны:  $\beta_{4,2} = 0$ ,  $\beta_{4,3} = 0,0009$ ,  $\beta_{4,4} = 0$ .

Отсюда

$$Q_m = 0 \cdot 6 \cdot (1-0,9)^2 \cdot 0,9^2 + 0,0009 \cdot 4 \cdot 4(1-0,9)^3 \cdot 0,9^3 + 0 \cdot 1 \cdot (1-0,9)^4 \cdot 0,9^4 = 0,0009.$$

Значит, при использовании полиномиального кода с  $m = 4$  и образующим полиномом  $x^3 + x + x^0$  при  $p = 0,9$  необнаруживаемая ошибка возникает с вероятностью менее одного процента ( $Q_m = 0,9\%$ ).

### 3. Анализ вероятностных характеристик полиномиальных кодов

Обнаруживающие характеристики помехозащищенных кодов различны. Доли необнаруживаемых полиномиальными кодами ошибок, построенных с помощью разных образующих полиномов при фиксированной длине контрольного вектора, также имеют разные показатели. В работах [16, 17] приводятся наилучшие образующие полиномы, рекомендуемые для построения помехозащищенного кода, при которых обнаруживается максимальное число возможных ошибок. Следовательно, далее будут рассматриваться образующие полиномы,

наилучшие из своего класса (класс полиномов — это группа полиномов, формирующих одинаковую длину контрольного вектора; соответственно, коды, полученные с помощью этих полиномов, относятся также к данному классу).

Введем обозначение образующих полиномов для упрощения представления в виде  $PX$ , где  $P$  — обозначение принадлежности рассматриваемого класса кодов к полиномиальным, а  $X$  — десятичный эквивалент двоичных коэффициентов образующего многочлена. Например, образующий полином  $x^3 + x + x^0$  имеет три ненулевых коэффициента, что в десятичной форме соответствует числу 11, значит, полином  $x^3 + x + x^0$  обозначим как  $P11$ .

Среди группы полиномов, формирующих контрольный вектор со значением  $k = 2$ , наилучшими образующими полиномами являются полиномы  $P5$  ( $x^2 + x + x^0$ ) и  $P7$  ( $x^2 + x + x^0$ ) [23]. В таблице 1 приводятся рассчитанные вероятности необнаруживаемых ошибок  $Q_m$  в зависимости от длины информационного вектора  $m = 4 \div 20$  для полиномиальных кодов с вышеприведенными образующими полиномами со значением  $p = 0,8$ . Приведены значения вероятностей  $Q_{m,d}$ , а также доля вероятностей ошибок по кратностям  $\gamma_{m,d}$  от вероятностей общего числа необнаруживаемых ошибок при использовании образующих полиномов  $P5$  и  $P7$ :

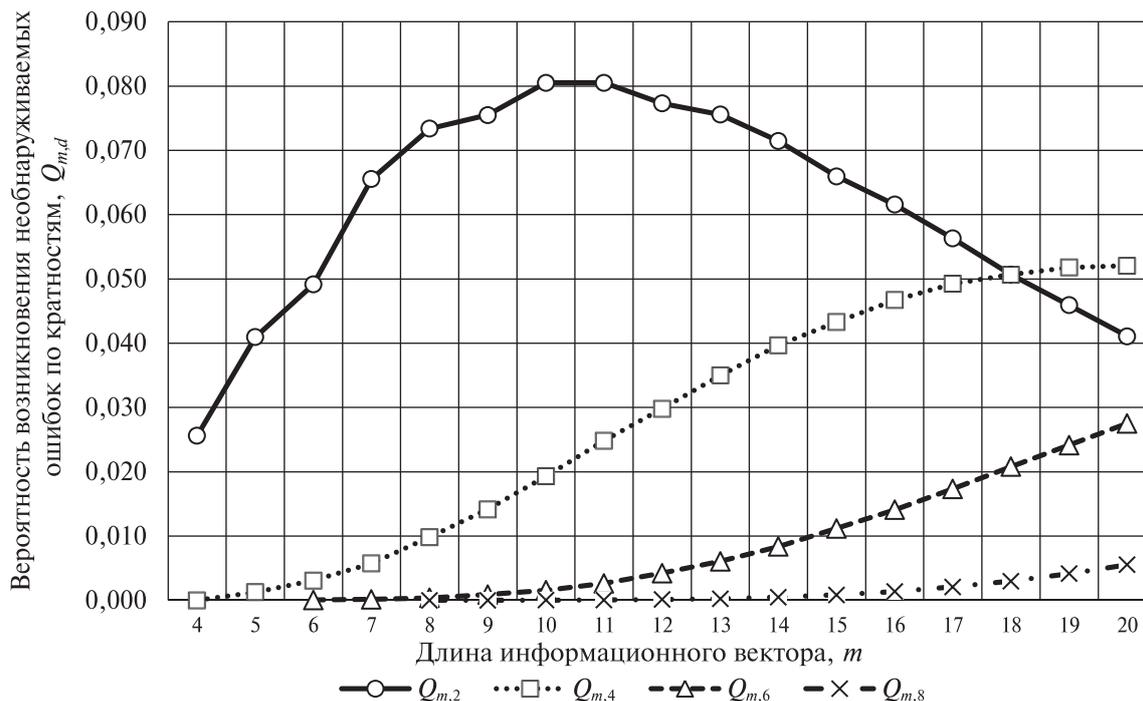
$$\gamma_{m,d} = \frac{Q_{m,d}}{Q_m}. \quad (3)$$

Можно заметить, что при использовании полинома  $P5$  в качестве образующего формируется полиномиальный код, обнаруживающий все ошибки с нечетными кратностями, и в данном случае значение вероятностей появления трехкратных ошибок равно нулю ( $Q_{m,3} = 0$ ). Но, анализируя таблицу 1, можно увидеть, что даже в случае обнаружения всех ошибок нечетной кратности при образующем полиноме  $P5$  общие вероятностные характеристики кода, построенного с использованием образующего полинома  $P7$ , намного лучше по сравнению с обнаружением ошибок четной кратности (см. значения  $Q_m$  для  $P5$  и  $P7$ ). Особенно это заметно при возрастании кратности ошибки и длины информационного вектора, но и при небольшом значении этих параметров разница все равно сохраняется с приоритетом полинома  $P7$ . Для четных кратностей ( $d = 2, 4$  и т. д.) вероятность возникновения необнаруживаемой ошибки  $Q_{m,d}$  при полиноме  $P5$  почти вдвое больше, чем при полиноме  $P7$ , и такие показатели сохраняются при всей представленной длине  $m$ .

На рисунке 2 показана зависимость вероятности возникновения необнаруживаемых ошибок по кратностям от значения длины информационного вектора при полиномиальных кодах на основе образующего полинома  $P7$ . Как показывает график, значительная доля вероятностей необнаруженных ошибок при небольшой ( $m = 4 \div 10$ ) длине информационного вектора приходится на двукратные ошибки (около 80 %), но с увеличением  $m > 10$  этот показатель начинает уменьшаться, а вероятность обнаружения трехкратных ошибок и т. д. стремительно растет.

**Таблица 1.** Значение вероятностей необнаруживаемых ошибок малых кратностей для некоторых полиномиальных кодов второго класса при  $p = 0,8$

$m$	Вероятность появления необнаруживаемых ошибок $Q_m$		Вероятность возникновения необнаруживаемых ошибок по кратностям $d$ при разных полиномах $Q_{m,2}$						Доля вероятностей ошибок кратности $d$ от вероятностей общего числа необнаруживаемых ошибок, % $\gamma_{m,2}$						$\gamma_{m,3}$		$\gamma_{m,4}$	
	$P5$	$P7$	$Q_{m,2}$		$Q_{m,3}$		$Q_{m,4}$		$P5$	$P7$	$P5$	$P7$	$P5$	$P7$	$P5$	$P7$	$P5$	$P7$
			$P5$	$P7$	$P5$	$P7$	$P5$	$P7$										
4	0,052799	0,038401	0,05119949	0,02560051	0	0,01280000	0,00160000	0	0,969697	66,6671	0	33,3329	3,0303	0				
5	0,085760	0,062720	0,08192000	0,04096000	0	0,02048000	0,00384000	0,00128000	95,5224	65,3061	0	32,6531	4,4776	2,0408				
6	0,107520	0,085056	0,09830400	0,04915200	0	0,03276800	0,00921600	0,00307200	91,4286	57,7878	0	38,5252	8,5714	3,6117				
7	0,133683	0,111566	0,11796441	0,06553731	0	0,03932193	0,01556488	0,00573440	88,2420	58,7428	0	35,2453	11,6431	5,1399				
8	0,151227	0,132772	0,12582870	0,07340032	0	0,04718613	0,02490381	0,00983060	83,2054	55,2829	0	35,5391	16,4679	7,4041				
9	0,170140	0,150775	0,13421639	0,07549747	0	0,05662336	0,03460304	0,01415606	78,8857	50,0730	0	37,5549	20,3379	9,3889				
10	0,183016	0,168288	0,13421639	0,08053164	0	0,06039798	0,04613739	0,01929401	73,3358	47,8535	0	35,8897	25,2095	11,4649				
11	0,196113	0,182297	0,13421907	0,08053144	0	0,06442471	0,05704237	0,02483001	68,4397	44,1759	0	35,3405	29,0865	13,6206				
12	0,205154	0,193878	0,12885031	0,07731018	0	0,06871969	0,06845084	0,02979601	62,8067	39,8757	0	35,4448	33,3656	15,3684				
13	0,214014	0,204261	0,12369547	0,07559108	0	0,06871941	0,07838323	0,03500367	57,7979	37,0070	0	33,6429	36,6253	17,1367				
14	0,220213	0,212570	0,11544911	0,07146718	0	0,06872066	0,08778922	0,03968563	52,4262	33,6205	0	32,3284	39,8657	18,6694				
15	0,226131	0,219351	0,10775291	0,06596971	0	0,06872066	0,09524476	0,04329341	47,6507	30,0750	0	31,3291	42,1193	19,7371				
16	0,230321	0,225180	0,09851695	0,06157335	0	0,06597140	0,10159441	0,04672995	42,7737	27,3440	0	29,2972	44,1099	20,7523				
17	0,234243	0,229841	0,09007233	0,05629545	0	0,06333285	0,10590447	0,04925726	38,4526	24,4932	0	27,5551	45,2114	21,4310				
18	0,237050	0,233619	0,08106510	0,05066590	0	0,06079954	0,10893031	0,05066461	34,1975	21,6874	0	26,0251	45,9525	21,6869				
19	0,239633	0,236787	0,07295767	0,04593739	0	0,05674494	0,11011215	0,05179181	30,4456	19,4003	0	23,9645	45,9503	21,8727				
20	0,241501	0,239320	0,06485126	0,04107283	0	0,05296136	0,11011215	0,05206238	26,8534	17,1623	0	22,1300	45,5948	21,7543				



**Рис. 2.** Зависимость вероятности возникновения необнаруживаемых ошибок по кратностям полиномиальными кодами, построенных с использованием образующего полинома  $P7$ , от значения длины информационного вектора при  $p = 0,8$

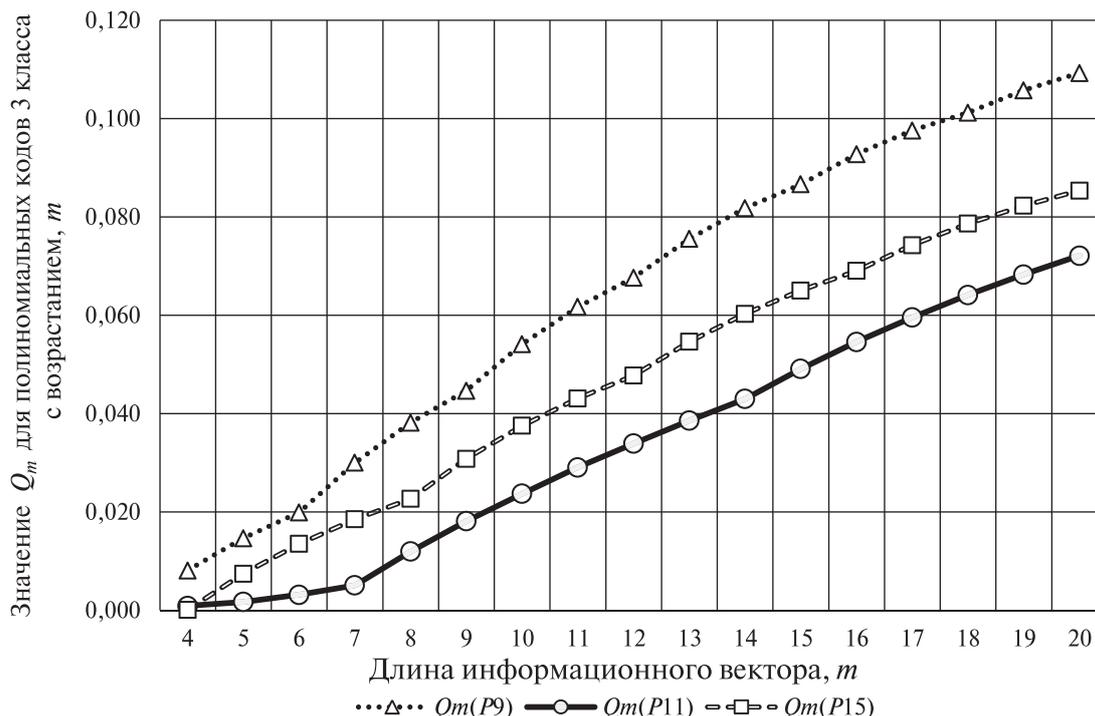
Таким образом, по графику и данным таблицы 1 можно выявить такую закономерность: при увеличении длины информационного вектора пропорционально уменьшается вероятность возникновения необнаруживаемых ошибок малых кратностей, а вероятность появления необнаруживаемых ошибок больших кратностей, наоборот, возрастает.

Среди образующих полиномов третьего класса, т. е. таких полиномов, с помощью которых формируются коды с  $k = 3$ , оптимальными выступают полиномы  $P9$ ,  $P11$  ( $P13$ ) и  $P15$ . Полиномы  $P11$  и  $P13$  имеют практически одинаковые обнаруживающие характеристики, следовательно, будет достаточно рассмотреть один из них. В таблице 2 приводятся значения  $Q_m$  при  $p = 0,9$  (даны показатели  $Q_m$  при другом значении  $p$  для отображения изменения доли необнаруживаемых ошибок по кратностям, т. е. с увеличением  $p$  увеличивается доля необнаруживаемых ошибок меньших кратностей) для выбранных кодов, и наименьшие вероятностные показатели в этом случае имеет полиномиальный код, построенный на основе полинома  $P11$ .

С увеличением значений  $m$  соответственно возрастает показатель  $Q_m$ , т. к. при любых  $m$  используются образующие полиномы только третьего класса, что, соответственно, воспроизводит одинаковое количество контрольных разрядов. Как уже отмечалось, самые низкие показатели  $Q_m$  (табл. 2, рис. 3) при заданном диапазоне  $m$  имеет полиномиальный код, построенный с помощью полинома  $P11$ . Но стоит отметить, что этим кодом некоторая доля ошибок нечетных кратностей (в табл. 2 не приводится) не обнаруживается, а полиномиальными кодами, построенными с помощью полиномов  $P9$  и  $P15$ , обнаруживаются полностью.

Таблица 2. Значение вероятностей необнаруживаемых ошибок для полиномиальных кодов третьего класса при  $p = 0,9$ 

$m$	Вероятность появления необнаруживаемых ошибок $Q_m$				Доля вероятностей ошибок кратности $d$ от вероятностей общего числа необнаруживаемых ошибок, %														
	$Q_m$				$\gamma_{m,2}$			$\gamma_{m,4}$			$\gamma_{m,6}$			$\gamma_{m,8}$					
	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$	$P_{15}$	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$	$P_9$	$P_{11}$	$P_{15}$
4	0,0081	0,0009	0,0001	0,0001	100	0	0	0	0	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,0147	0,0017	0,0075	0,0075	99,386	0	97,590	0,613	5,263	2,409	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	0,0199	0,0032	0,0135	0,0135	98,775	0	97,005	1,219	7,692	2,994	0,005	0	0	—	—	—	—	—	—
7	0,0300	0,0051	0,0185	0,0185	98,292	0	95,664	1,698	9,999	4,330	0,009	0	0,004	—	—	—	—	—	—
8	0,0382	0,0120	0,0227	0,0227	97,404	44,384	93,628	2,576	6,028	6,357	0,019	0,020	0,014	0	0	0	0	0	0
9	0,0447	0,0182	0,0308	0,0308	96,386	52,690	93,064	3,569	5,854	6,893	0,044	0,040	0,042	0	0	0	0	0,0001	0,0003
10	0,0541	0,0237	0,0376	0,0376	95,411	54,445	91,707	4,515	6,497	8,208	0,072	0,069	0,083	0,0001	0,0002	0,0005	0,0008	0,0008	0,0008
11	0,0617	0,0291	0,0431	0,0431	94,145	53,260	89,866	5,733	7,232	9,985	0,120	0,117	0,147	0,0004	0,0005	0,0005	0,0008	0,0008	0,0008
12	0,0677	0,0339	0,0478	0,0478	92,740	51,374	87,592	7,060	8,369	12,165	0,197	0,178	0,240	0,0011	0,0012	0,0012	0,0019	0,0019	0,0019
13	0,0756	0,0386	0,0546	0,0546	91,355	48,795	86,160	8,356	9,538	13,473	0,286	0,262	0,362	0,0024	0,0024	0,0024	0,0036	0,0036	0,0036
14	0,0818	0,0430	0,0603	0,0603	89,743	45,940	84,269	9,843	10,776	15,201	0,410	0,371	0,522	0,0048	0,0046	0,0046	0,0068	0,0068	0,0068
15	0,0867	0,0491	0,0651	0,0651	88,002	46,560	82,040	11,407	11,305	17,218	0,581	0,492	0,729	0,0087	0,0077	0,0077	0,0120	0,0120	0,0120
16	0,0928	0,0546	0,0690	0,0690	86,280	46,071	79,518	12,934	12,047	19,470	0,770	0,640	0,989	0,0148	0,0126	0,0126	0,0204	0,0204	0,0204
17	0,0976	0,0596	0,0743	0,0743	84,378	44,937	77,601	14,583	12,930	21,076	1,013	0,816	1,289	0,0240	0,0197	0,0197	0,0320	0,0320	0,0320
18	0,1012	0,0642	0,0787	0,0787	82,372	43,322	75,383	16,270	13,798	22,918	1,319	1,026	1,648	0,0375	0,0295	0,0295	0,0488	0,0488	0,0488
19	0,1058	0,0683	0,0823	0,0823	80,390	41,512	72,938	17,903	14,771	24,913	1,649	1,266	2,075	0,0560	0,0432	0,0432	0,0724	0,0724	0,0724
20	0,1093	0,0721	0,0854	0,0854	78,272	39,529	70,306	19,598	15,719	27,015	2,046	1,541	2,571	0,0814	0,0614	0,0614	0,1047	0,1047	0,1047



**Рис. 3.** Значения вероятностей необнаруживаемых ошибок кодами, построенных с помощью полиномов  $P_9$ ,  $P_{11}$  и  $P_{15}$  при  $p = 0,9$ , в зависимости от  $m$

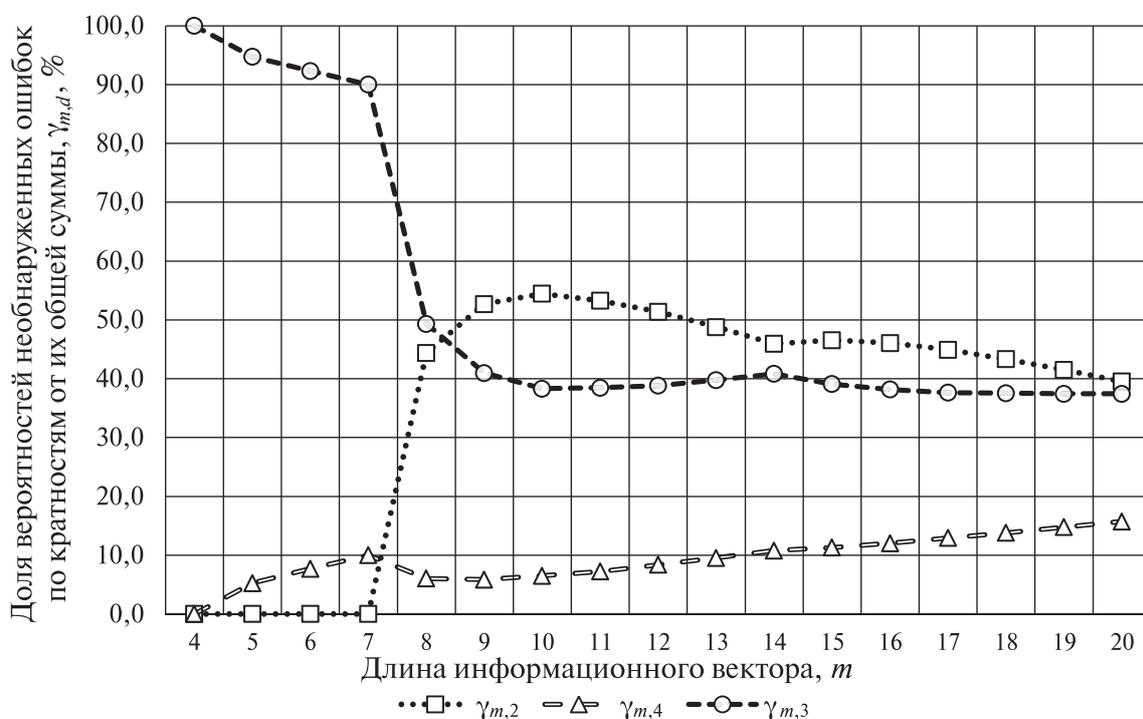
При анализе показателей доли вероятности необнаруживаемых ошибок сразу бросаются в глаза показатели для полиномиального кода на основе полинома  $P_{11}$  для двукратных ошибок. До значения информационного вектора  $m = 7$  этот показатель  $\gamma_{m,2(P_{11})} = 0$ , а значит, этим кодом обнаруживаются все двукратные ошибки (см. рис. 3 и 4). На графике рисунка 3 это также прослеживается (выше была приведена закономерность, показывающая, что при небольших значениях  $m$  вероятность появления необнаруживаемых двукратных ошибок большая, а следовательно, использование кода с обнаружением всех двукратных ошибок снижает показатель  $Q_m$ ). Далее, при  $m > 8$  значение  $\gamma_{m,2(P_{11})}$  резко возрастает (рис. 4) и при  $m > 10$  начинает обратно уменьшаться. Из этого следует, что для кода, построенного с помощью образующего полинома  $P_{11}$ , существует «наихудшее» значение  $m$ , при котором на долю двукратных ошибок приходится наибольшее значение вероятности их необнаружения, и это  $m = 9 \div 12$ . При разных значениях  $p$  эта точка остается также неизменной.

Выше рассматривался пример расчета вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки для кода  $P(7,4)$ , и по результатам расчета значение вероятности получилось равным менее 1 % ( $Q_m = 0,0009$ ). По графику (рис. 4) можно проследить результаты расчета, т. к. при  $m = 4$  доля необнаруживаемых ошибок имеет ненулевое значение только для трехкратных ошибок  $\beta_{4,3} = 0,0009$ , и на графике видно, что при данном значении  $m$  доля вероятности появления необнаруживаемой трехкратной ошибки  $\gamma_{m,3} = 100\%$ , а для остальных кратностей

она равна нулю. До значения  $m \leq 7$  также начинает незначительно расти доля вероятности необнаруживаемых четырехкратных ошибок. С увеличением длины информационного вектора значение  $\gamma_{m,3}$  начинает уменьшаться и при  $m = 8$  становится приблизительно равно значению  $\gamma_{m,2}$ .

По таблице 2 видно, что при использовании полиномов  $P9$ ,  $P11$  и  $P15$  для построения полиномиальных кодов доля вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки максимальных кратностей при конкретном  $m$  равна нулю. В процессе расчетов было замечено, что при  $m \geq 13$  и  $p = 0,9$  для полиномиальных кодов третьего класса доля вероятностей появления необнаруживаемых ошибок кратностей  $d \geq 13$  равна нулю. Для полиномиальных кодов второго класса результаты расчетов при равных условиях одинаковы. Но с увеличением или уменьшением  $p$  значение  $Q_{m,d}$ , а также кратность, при которой  $Q_{m,d} = 0$ , меняется.

Таким образом, на основе полученных результатов расчетов и анализа вероятностных характеристик полиномиальных кодов второго и третьего классов оптимальными показателями обладают полиномиальные коды, построенные с помощью полиномов  $P7$  и  $P11$  ( $P13$ ) соответственно. Но стоит отметить также, что данные коды не обнаруживают некоторую долю ошибок нечетных кратностей. Если последнее очень значимо, рекомендуется применять полиномы  $P5$ ,  $P9$  или  $P15$  для формирования полиномиального кода с соответствующей длиной контрольного вектора, т. к. эти коды обнаруживают все ошибки нечетных кратностей и обладают хорошими вероятностными характеристиками.



**Рис. 4.** Распределение среди долей вероятности необнаруживаемых ошибок малых кратностей ( $d = 2, 3, 4$ ) кодом, построенным с помощью полинома  $P11$

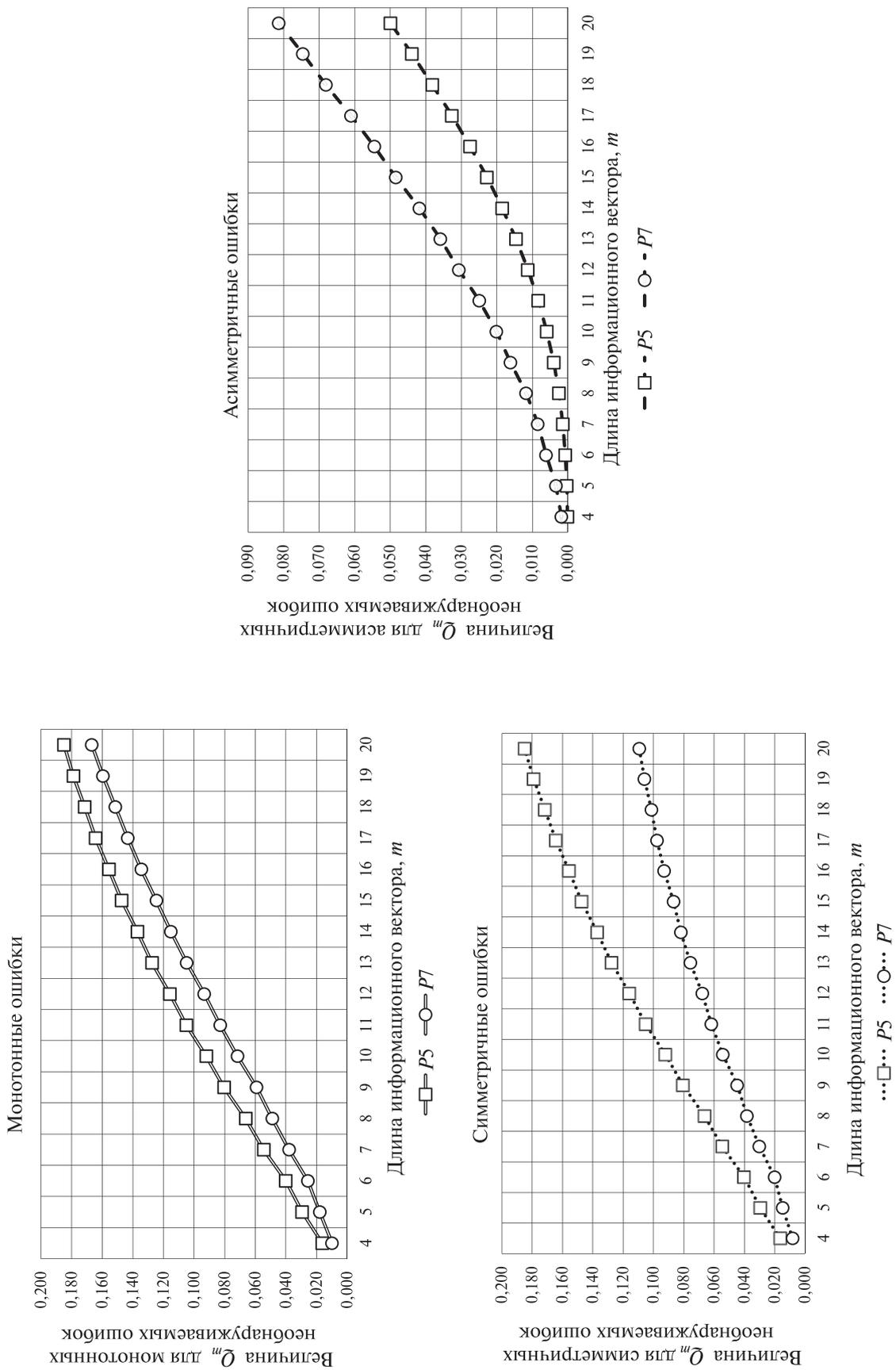
#### 4. Вероятностные характеристики полиномиальных кодов по видам необнаруживаемых ошибок

Зачастую при организации систем с обнаружением неисправностей используют отдельные свойства помехозащищенных кодов, связанные с обнаружением ошибок определенных видов. Например, в работах [24, 25] используются свойства обнаружения любых монотонных ошибок кодами с суммированием, а в [26, 27] — любых монотонных и асимметричных ошибок. Исследуемые полиномиальные коды также обладают уникальными обнаруживающими свойствами. Так, например, при использовании некоторых образующих полиномов формируются коды, обнаруживающие большое количество симметричных ошибок, а коды с суммированием данный тип ошибок обнаруживают плохо. Помимо этого, в ходе исследований свойств полиномиальных кодов были определены условия, при которых формируются коды, обнаруживающие любые симметричные и асимметричные ошибки.

С учетом вышесказанного были рассчитаны вероятностные характеристики по видам необнаруживаемых ошибок для некоторых полиномиальных кодов второго и третьего классов, обладающие наилучшими показателями «общих» вероятностных характеристик среди своего класса. Заменяя значение  $\beta_{m,d}$  в выражении (1) на доли необнаруженных монотонных —  $\beta_{m,d}^v$ , симметричных —  $\beta_{m,d}^s$  и асимметричных —  $\beta_{m,d}^a$  видов ошибок, а затем суммируя все показатели по кратностям и видам ошибок соответственно, получим величины  $Q_m^v$ ,  $Q_m^s$ ,  $Q_m^a$  по видам ошибок для исследуемых полиномиальных кодов.

На графиках рисунка 5 приводятся значения вероятности необнаружения монотонных, симметричных и асимметричных ошибок для кодов, построенные с помощью образующих полиномов  $P5$  и  $P7$  при разном  $m$ . По графикам нетрудно заметить, что вероятность возникновения необнаруживаемых монотонных и симметричных ошибок ниже у кодов, построенных при помощи полинома  $P7$ . Особенно это заметно в отношении симметричных ошибок, т. к. с возрастанием длины информационного вектора разница пропорционально увеличивается в силу того, что вероятность необнаруживаемых симметричных ошибок при полиноме  $P7$  возрастает не так стремительно, как при монотонных ошибках. Что касается кода на основе полинома  $P5$ , то здесь эти показатели для двух видов ошибок почти одинаковы.

Для асимметричных ошибок картина другая. Вероятность появления необнаруживаемой асимметричной ошибки возрастает нелинейно (на графике показана изогнутая кривая), т. е. при небольших значениях  $m = 8 \div 9$  на долю асимметричных ошибок приходится небольшое количество возникающих ошибок. Соответственно, вероятностные характеристики имеют низкие показатели, особенно у кодов, обнаруживающих данный вид ошибок. Кроме того, вероятностные характеристики лучше у кодов, построенных на основе полинома  $P5$ , особенно при небольших значениях  $m = 4 \div 7$ .



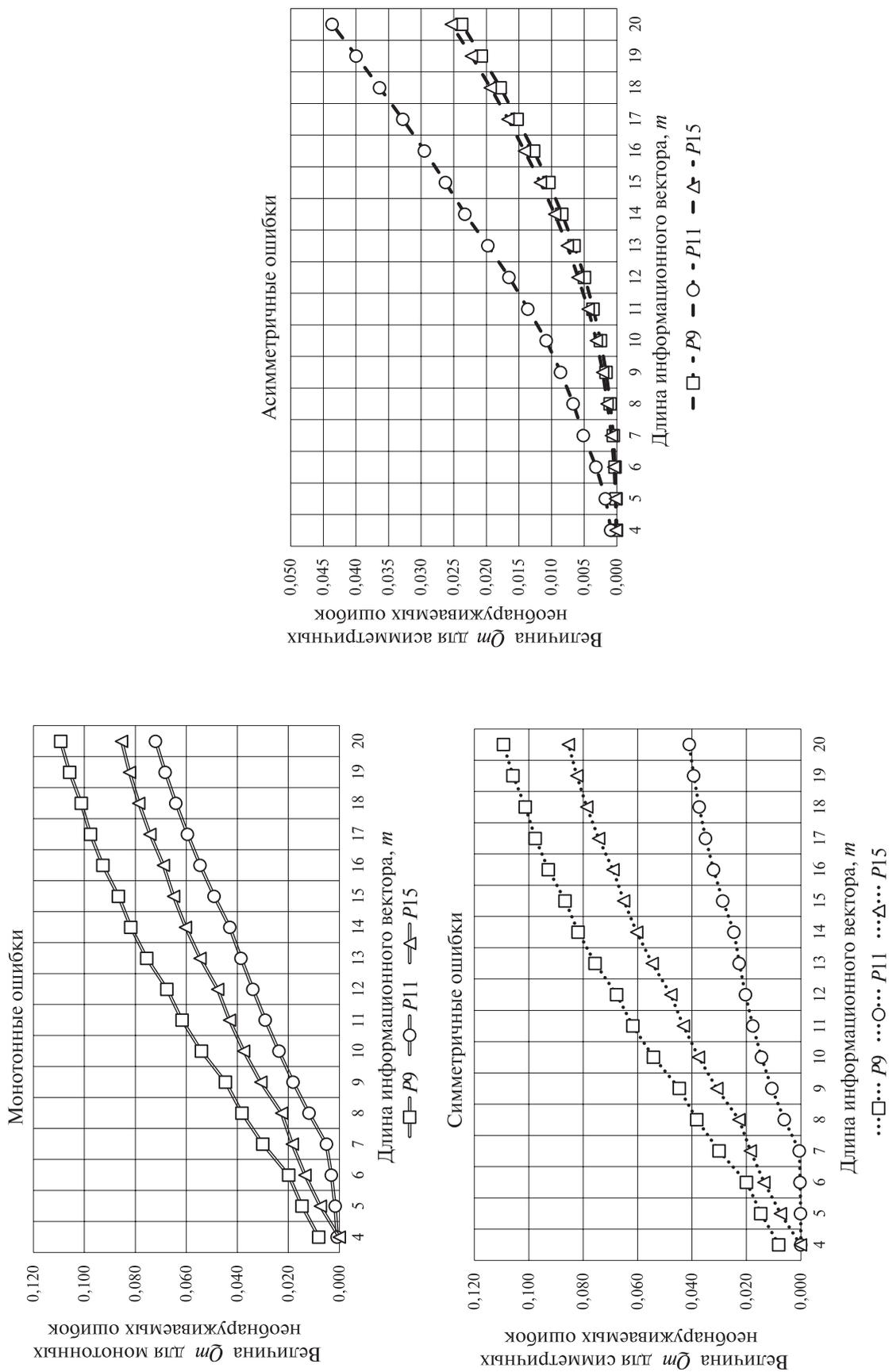
**Рис. 5.** Вероятностные характеристики обнаруживаемых ошибок по видам от их общего числа кодами, полученными для «наилучших» полиномов второго класса при  $p = 0,9$

На рисунке 6 приводятся вероятностные характеристики «наилучших» полиномиальных кодов третьего класса по появлению разных видов необнаруживаемых ошибок. Самые малые вероятности появления необнаруживаемых монотонных ошибок имеют коды, построенные с помощью полинома  $P11$  при длине вектора  $m \leq 7$ . Объясняется это тем, что коды, построенные на основе полинома  $P11$  до значения  $m \leq 7$ , обнаруживают любые двукратные ошибки, а на долю двукратных приходится большая часть необнаруживаемых ошибок. Следовательно, до значения  $m \leq 7$  величина  $Q_m^u$  складывается в основном из вероятности необнаружения трехкратных и четырехкратных монотонных ошибок, т. к. по результатам расчетов вероятности необнаруживаемых других кратностей монотонных ошибок для данного кода равны нулю.

Почти та же ситуация наблюдается и при значении показателей вероятности необнаруживаемых симметричных ошибок. Только характеристики полиномиальных кодов, построенных с использованием полинома  $P11$ , почти в два раза лучше, чем при монотонных ошибках для этих же кодов. Следует отметить, что все симметричные ошибки имеют кратность, равную двум, соответственно, до значения  $m \leq 7$ , величина  $Q_m^s$  в этом случае будет складываться из значений вероятностей необнаруживаемых ошибок только четных кратностей. По результатам расчетов для кодов, построенных с помощью полинома  $P11$ , как и при монотонных ошибках, вероятности возникновения необнаруживаемых ошибок больших кратностей ( $d = 5; 6; 7$ ) при  $m \leq 7$  равны нулю. Вероятность возникновения необнаруживаемых двукратных симметричных ошибок также равна нулю. И лишь незначительные доли вероятности необнаруженных симметричных ошибок получены для четырехкратных ошибок, которые в общей сложности возникают с вероятностью менее 1 %. Соответственно, на графике показано «поведение» показателей вероятностей для симметричных ошибок при  $m \leq 7$  для кодов на основе полинома  $P11$ .

В случае обнаружения асимметричных ошибок полиномиальными кодами третьего класса почти одинаковые вероятностные характеристики имеют коды, построенные с помощью полиномов  $P9$  и  $P15$ . Увеличение значения контрольного вектора на  $k + 1$ , т. е. применение полиномиальных кодов третьего класса по сравнению со вторым, снизило вероятности появления необнаруженных асимметричных ошибок приблизительно вдвое. Это можно заметить, сравнивая графики вероятностных характеристик необнаруженных асимметричных ошибок на рисунках 5 и 6 для полиномиальных кодов второго и третьего классов. Но все-таки лучшими характеристиками обнаружения асимметричных ошибок среди полиномиальных кодов третьего класса обладают коды, построенные с помощью полиномов  $P9$  и  $P15$ . Вероятностные характеристики для кода на основе полинома  $P11$  в этом случае чуть хуже.

Таким образом, для обнаружения большего количества монотонных и симметричных ошибок при использовании полиномиальных кодов второго и третьего классов рекомендуется применять образующие полиномы  $P7$  и  $P11$  соответственно, а для асимметричных ошибок —  $P5$  и  $P9$  или  $P15$  соответственно.



**Рис. 6.** Вероятностные характеристики обнаруживаемых ошибок по видам от их общего числа кодами, полученными для «наилучших» полиномов третьего класса при  $p = 0,9$

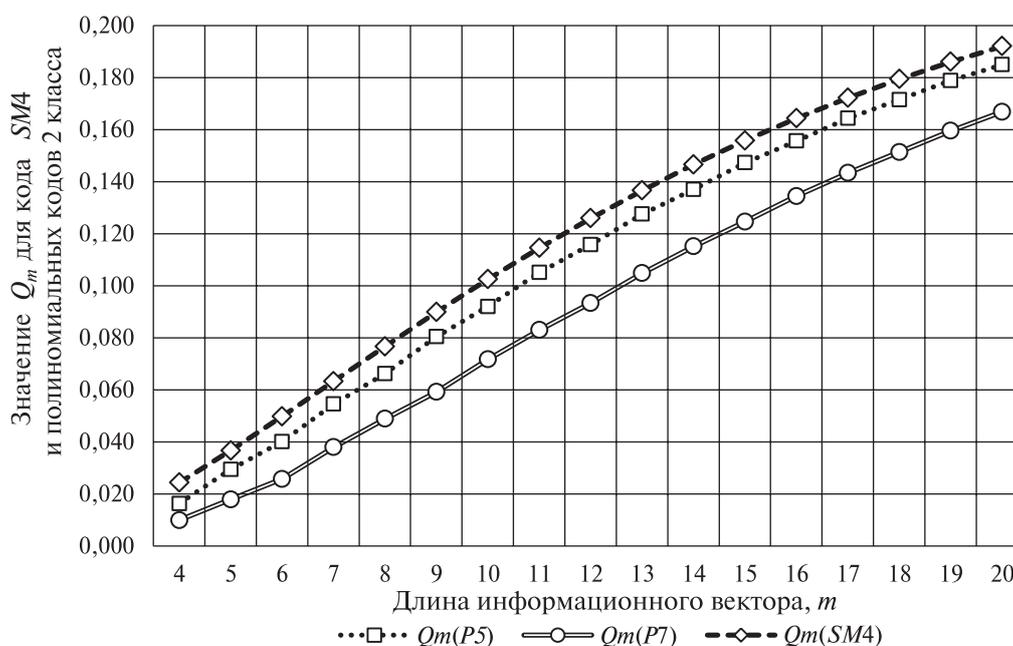
Проведенный анализ вероятностных характеристик по видам ошибок для исследуемых групп полиномиальных кодов может быть использован при анализе возникающих видов ошибок на выходах логических устройств, способствуя выработке рекомендаций по применению конкретного полинома при построении полиномиального кода, для обнаружения большего количества возникающих ошибок в зависимости от их вида.

### 5. Сравнение вероятностных характеристик полиномиальных кодов с кодом суммирования

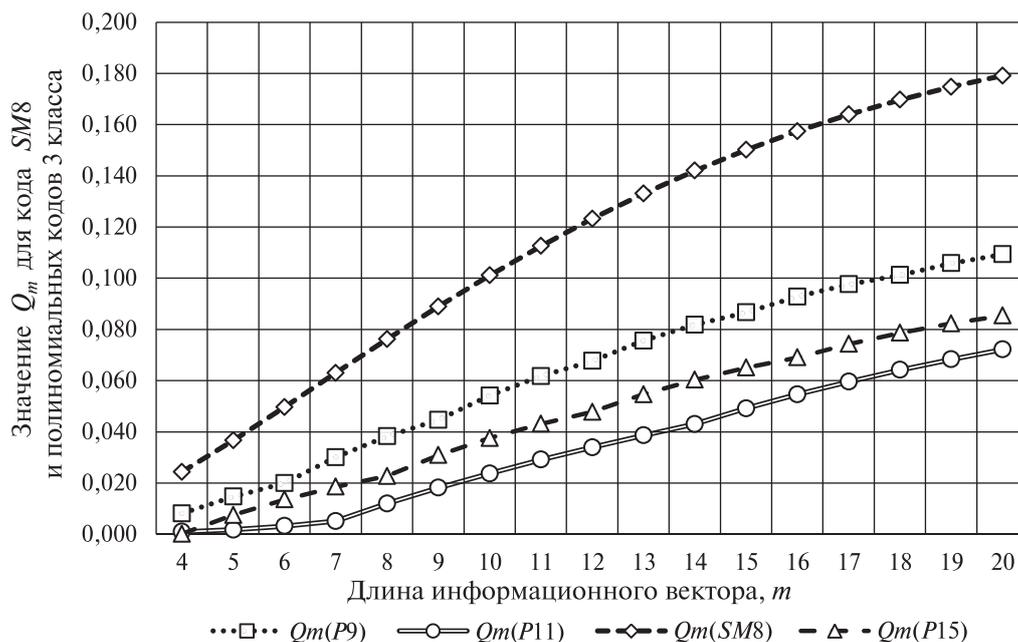
При решении задач помехоустойчивого кодирования широко используют коды с суммированием [28, 29]. Разработаны различные модификации этих кодов для построения систем функционального диагностирования.

Исследуемые классы полиномиальных кодов сравнивались с модульными кодами суммирования  $SM$  [30–33] — коды Боуза-Лина, ввиду возможности формирования одинаковой длины контрольного вектора при разных значениях  $m$ , как и при полиномиальных кодах. Для этого были рассчитаны вероятностные характеристики кодов  $SM4$  и  $SM8$ , полученные результаты сравнивались с оптимальными полиномиальными кодами соответствующего класса. Результаты представлены в виде графиков.

Как видно по графикам (рис. 7 и 8), значения  $Q_m$  при всем заданном диапазоне информационного вектора для полиномиальных кодов ниже, чем у кодов  $SM4$  и  $SM8$ . Следует отметить, что значения  $Q_m(P11)$  при небольших кратностях



**Рис. 7.** Вероятностные характеристики полиномиальных кодов второго класса и кода с суммированием  $SM4$  при  $p = 0,9$

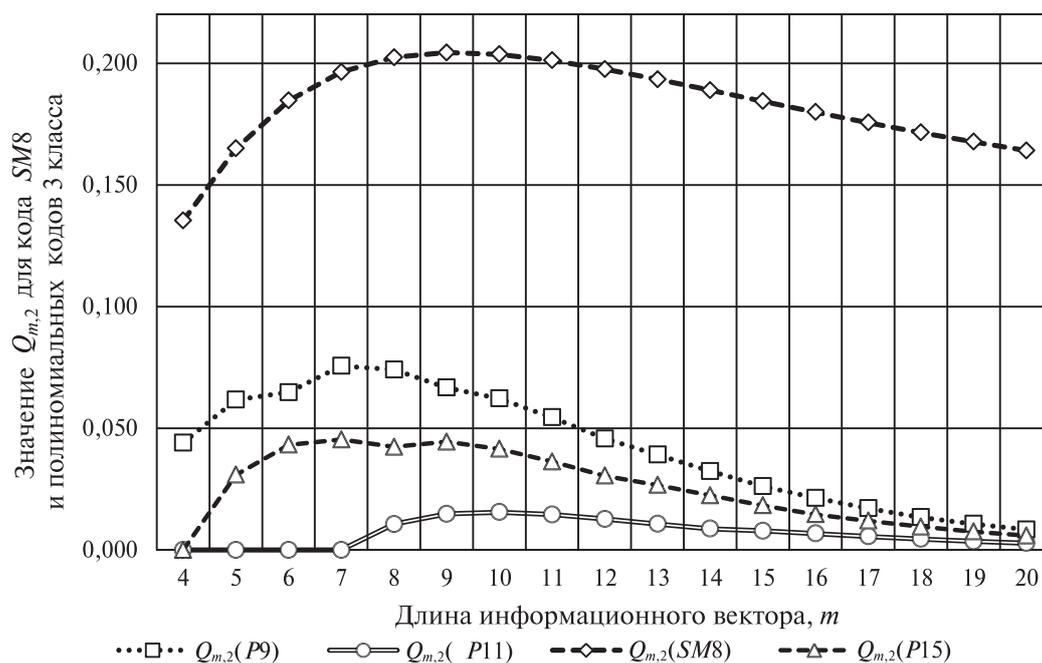


**Рис. 8.** Вероятностные характеристики полиномиальных кодов третьего класса и кода с суммированием SM8 при  $p = 0,9$

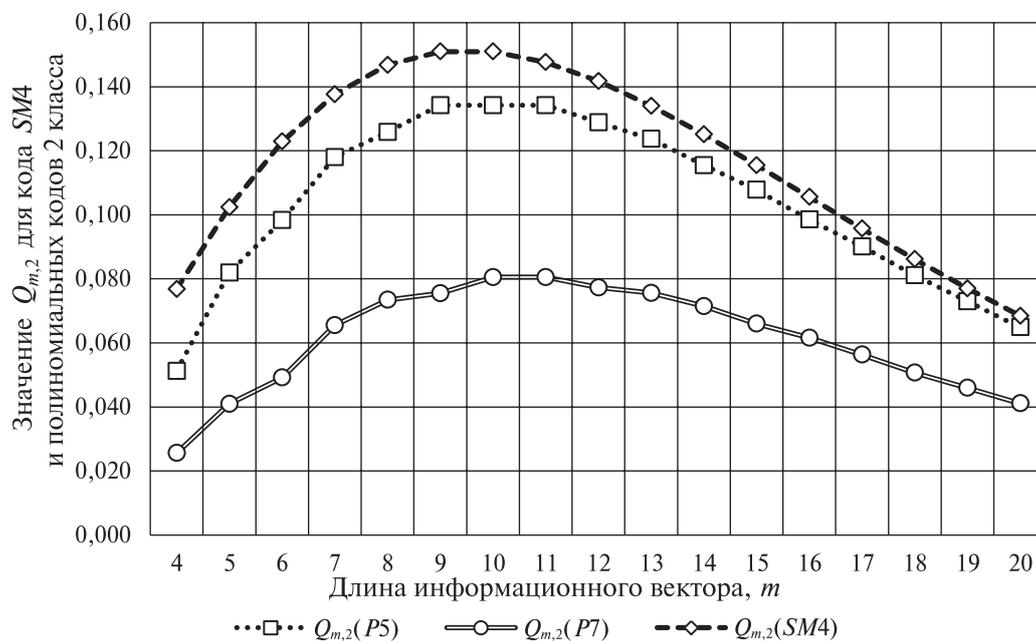
$m$  в несколько десятков раз меньше значения  $Q_m(SM8)$  благодаря обнаружению всех двукратных ошибок, доля которых максимальна среди всех необнаруживаемых.

Анализируя оба графика на рисунках 7 и 8, можно сделать вывод о том, что с увеличением значения контрольного вектора на  $k + 1$  вероятностные характеристики полиномиальных кодов резко улучшаются, в частности уменьшается вероятность появления необнаруживаемой ошибки любой кратности, а для кодов с суммированием остается почти неизменной. При изменении значения  $p$  преимущество также остается за полиномиальными кодами.

По результатам расчетов выяснилось, что при разных значениях  $p$  ( $p = 0,7; 0,8; 0,9$ ) и небольшой длине информационного вектора ( $m = 4 \div 12$ ) для полиномиальных и модульных кодов с суммированием основная доля необнаруживаемых ошибок приходится на двукратные. Следовательно, на рисунках 9 и 10 при разных значениях  $p$  приводятся значения  $Q_{m,2}$  для полиномиальных кодов и кодов с суммированием с увеличением  $m$ . Для полиномиальных кодов третьего класса эти показатели намного ниже, чем для кодов SM8. Даже если учесть, что кодами с суммированием обнаруживаются все ошибки нечетной кратности, полиномиальные коды, построенные с помощью полиномов  $P5$ ,  $P9$  и  $P15$ , также обнаруживают все ошибки нечетной кратности, и в данном случае эти коды все равно имеют лучшие вероятностные характеристики по обнаружению двукратных ошибок, чем соответствующие коды с суммированием.



**Рис. 9.** Вероятностные характеристики необнаружения двукратных ошибок полиномиальными кодами третьего класса и кодом с суммированием SM8 при  $p = 0,7$



**Рис. 10.** Вероятностные характеристики необнаружения двукратных ошибок полиномиальными кодами второго класса и кодом с суммированием SM4 при  $p = 0,8$

## Заключение

В работе были рассчитаны вероятностные характеристики полиномиальных кодов, построенных с помощью оптимальных полиномов второго и третьего классов, и определены вероятностные свойства этих кодов. По показателям вероятности появления необнаруживаемых ошибок выделены те полиномы, при которых вероятность проявления той или иной кратности ошибки имеет высокие показатели или вовсе равна нулю.

Произведен расчет вероятностных характеристик по видам необнаруживаемых ошибок выделенных полиномиальных кодов. Как показали расчеты, с обнаружением монотонных и симметричных ошибок при разном значении  $m$  лучше справляются коды, построенные с помощью полиномов  $P7$  и  $P11$  ( $P13$ ). Вероятность возникновения необнаруживаемых асимметричных ошибок меньше у кодов на основе полиномов  $P5$ ,  $P9$  и  $P15$ . Некоторыми кодами достигается полное обнаружение всех двукратных ошибок, вероятность необнаружения которых обладает высокими показателями при небольшой длине информационного вектора.

По сравнительному анализу результата расчетов вероятностных характеристик ярко выражается преимущество полиномиальных кодов над кодами с суммированием, особенно в аспекте обнаружения симметричных ошибок и ошибок малых кратностей. Также показана эффективность обнаружения ошибок при увеличении длины контрольного разряда полиномиальных кодов в сравнении с кодами с суммированием.

Полученные данные можно использовать для сравнения с характеристиками других помехоустойчивых кодов, чтобы выбрать оптимальные коды при построении систем функционального диагностирования. Применяя соответствующий образующий полином для построения помехоустойчивого кода (с учетом топологии проектируемых логических устройств и вида возникающих ошибок на их выходах), возможно построение диагностируемых систем с полным обнаружением всех возникающих неисправностей.

Вероятностные характеристики исследованных полиномиальных кодов могут быть использованы не только при синтезе систем технической диагностики, но и в области передачи, обработки и хранения информации.

## Библиографический список

1. Барсуков В. С. Новые технологии интеллектуальных объектов: комфорт плюс безопасность // Бюро научно-технической информации. — 2006.
2. Брылеев А. М., Переборов А. С., Сапожников Вл. В., Смирнова А. В., Эйлер А. А. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики. — М.: Транспорт, 1977. — 376 с.
3. Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И. Системы автоматического управления летательных аппаратов. — М.: ВВИА им. Жуковского, 1985. — 476 с.

4. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М.: Радио и связь, 1989. — 207 с.
5. *Mitra S., McCluskey E. J.* Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. — P. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Н17. В 10 т. Техническая диагностика / Под общ. ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. — М.: Машиностроение, 1987. — Т. 9. — 352 с.
7. *Goessel M., Graf S.* Error Detection Circuits. — London: McGraw-Hill, 1994. — 261 p.
8. *Piestrak S. J.* Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
9. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. — John Wiley & Sons, 2006. — 720 p
10. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. — Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. — 184 p.
11. *Ефанов Д. В.* Модифицированный код паритета в схемах функционального контроля / Вестник УрГУПС. — 2011. — № 4. — С. 4–14.
12. *Marouf M. A., Friedman A. D.* Design of Self-Checking Checkers for Berger Codes / In: Proc. 8th Annual Intern. Conf. on Fault — Tolerant Computing, Toulouse. — 1978. — Vol. C-27. — P. 179–183.
13. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes / A. Morozov, V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Gossel // 3–5 July 2000, Palma de Mallorca, Spain. — P. 141–146.
14. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с.
15. *Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Abdullaev R.* Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
16. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б.* О свойствах полиномиальных кодов в системах функционального контроля // Информатика и системы управления. — 2018. — № 2. — С. 50–61. DOI: 10.22250/isu.2018.56.50–61.
17. *Абдуллаев Р. Б.* Свойства полиномиальных кодов в системах функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4, № 4. — С. 655–686.
18. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 155–162.
19. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Предельные свойства кода с суммированием // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2010. — № 3. — С. 290–299.
20. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. — 2015. — Т. 58, № 5. — С. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
21. *Ефанов Д. В., Блюдов А. А.* Коды Хэмминга и их обнаруживающие способности в схемах функционального контроля // Информатика и системы управления. — 2012. — № 2. — С. 100–111.

22. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Вероятностные свойства кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация. Сборник научных трудов. — СПб.: ПГУПС. — 2011. — С. 3–13.
23. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б. Особенности организации систем функционального контроля комбинационных схем на основе полиномиальных кодов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15, № 3. — С. 432–445.
24. Busaba F.Y., Lala P. K. “Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors”, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. — 1994. — Vol. 5, iss. 1. — P. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.
25. Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. “Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs”, *VLSI Design*. — 1998. — Vol. 5, iss. 4. — P. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
26. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 2017. — P. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
27. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // Автоматика и телемеханика. — 2017. — № 5. — С. 152–165.
28. Berger J.M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // *Information and Control*. — 1961. — Vol. 4, iss. 1. — P. 68–73. DOI: 10.1016/S0019–9958(61)80037–5.
29. Bose B., Lin D. J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // *IEEE Transaction on Computers*. — 1985. — Vol. C-34. — P. 1026–1032.
30. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 10. — С. 152–169.
31. Das D., Toubia N. A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. — 1999. — Vol. 15, iss. 1–2. — P. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
32. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д. В., Черепанова М. Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах // *Электронное моделирование*. — 2016. — Т. 38, № 2. — С. 27–48.
33. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Черепанова М. Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. II. Уменьшение структурной избыточности систем функционального контроля // *Электронное моделирование*. — 2016. — Т. 38, № 3. — С. 47–61.

**R. B. Abdullaev**

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

**PROBABILISTIC FEATURES OF POLYNOMIAL CODES  
IN TECHNICAL DIAGNOSIS SYSTEMS**

Probabilistic features of some polynomial codes in case of fault occurrence in data bits with faultlessness of check bits, the latter being topical for the systems of technical diagnosis of automation devices, are considered in the article. The method of calculating probability of undetectable errors by the given codes was described depending on the probability of error detection failure in one data bit. It was demonstrated that together with the data bit length increase, probability of occurrence of low-multiplicity errors is reduced. The polynomials by means of which codes with the best indices of probabilistic features are built were singled out of all polynomials producing codes with the same number of check bits. The dependency of probability of undetectable maximum-multiplicity errors under various failure-free operation indices of circuits under diagnosis was established. Probabilistic features were calculated according to the types of undetectable errors of polynomial codes under study. Generator polynomials were singled out by means of which codes with the minimum probabilistic indices for detection failure of certain types of errors are built.

Polynomial codes can be divided into classes of codes with constant number of check bits. Therefore, the former should be compared with modular summation codes, which also possess constant number of check bits, according to their characteristics. To achieve this, probabilistic features of summation codes were calculated and compared with characteristics of polynomial codes. Calculations have shown that in case of different probability values of one data bit distortion, occurrence probability for undetectable errors in polynomial codes is much lower than in summation codes.

During the research a full catalogue of probabilistic features of codes with  $k=2$  and  $k=3$  polynomial codes and summation codes has been compiled. The catalogue may be used for the analysis of probabilistic characteristics of other separable codes applied for the purposes of technical diagnosis.

Concurrent checking; undetectable error; polynomial code; error detection probability in the data vector of a code; probabilistic feature of the polynomial code

**References**

1. Barsukov V. S. (2006) *Noviye Tekhnologii Intellektualnykh Obyektov: Komfort Plyus Bezopasnost* [New Technologies of Intelligent Objects: Comfort Plus Safety]. *Byuro Nauchno-tekhnicheskoy informatsii* [Scientific and Technical Information Bureau]. (In Russian)
2. Bryleev A. M., Pereborov A. S., Sapozhnikov V. V., Smirnova A. V. & Eiler A. A. (1977) *Teoreticheskiye osnovy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Theoretical foundations of railway automation and remote control]. Moscow, Transport Publ., 376 p. (In Russian)
3. Krasovskiy A. A., Vavilov Yu. A. & Suchkov A. I. (1985) *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya letatelnykh apparatov* [Automatic control systems for flying vehicles]. Moscow, VVIA im. Zhukovskogo [Zhukovsky Airforce Engineering Academy] Publ., 476 p. (In Russian)
4. Sogomonyan E. S. & Slabakov E. V. (1989) *Samoproveryaemiye i otkazoustoichiviye sistemy* [Self-checking units and fault-tolerant systems]. Moscow, Radio i svyaz [Radio and telecommunication] Publ., 207 p. (In Russian)

5. *Mitra S. & McCluskey E.J.* (2000) Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proceedings of International Test Conference*. USA, Atlantic City, NJ, pp. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
6. (1987) Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Spravochnik. Tekhnicheskaya diagnostika [Reliability and efficiency in engineering. Manual. Diagnostic engineering]. Under general editorship of V. V. Kluyev, P. P. Parkhomenko N17. In 10 vol. Moscow, Mashinostroeniye [Mechanical engineering] Publ., vol. 9, 352 p. (In Russian)
7. *Goessel M. & Graf S.* (1995) Error Detection Circuits. London, McGraw-Hill Publ., 1994, 261 p.
8. *Piestrak S. J.* Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Publ., 111 p.
9. *Fujiwara E.* (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. USA, New York, John Wiley & Sons Publ., 720 p.
10. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomyan E. & Marienfeld D.* (2008) New Methods of Concurrent Checking. Edition 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Publ., 184 p.
11. *Efanov D. V.* (2011) Modifitsirovanniy kod pariteta v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [Modified parity code in concurrent error detection circuits]. *Vestnik UrGUPS [Proceedings of the Ural State University of Railway Transport]*, no. 4, pp. 4–14. (In Russian)
12. *Marouf M.A. & Friedman A. D.* (1978) Design of Self-Checking Checkers for Berger Codes / In: Proc. 8th Annual Intern. Conf. on Fault — Tolerant Computing, Toulouse, vol. C-27, pp. 179–183.
13. *Morozov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Gossel M.* (2000) New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes. Palma de Mallorca, Spain, pp. 141–146.
14. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V.* (2018) Kody Khemminga v sistemakh funktsionalnogo kontrolya logicheskikh ustroystv: monografiya [Hamming codes in concurrent error detection systems of logical units: monograph]. St. Petersburg, Nauka [Science] Publ., 151 p. (In Russian)
15. *Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. & Abdullaev R.* (2018) Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits. *Proceedings of 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*. Kazan, pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
16. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Efanov D. V. & Abdullaev R. B.* (2018) O svoistvakh polinomialnykh kodov v sistemakh funktsionalnogo kontrolya [Properties of polynomial codes in concurrent error detection systems]. *Informatika i sistemy upravleniya [Information technology and control systems]*, no. 2, pp. 50–61. DOI: 10.22250/isu.2018.56.50–61. (In Russian)
17. *Abdullaev R. B.* (2018) Svoistva polinomialnykh kodov v sistemakh funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem [Properties of polynomial codes in concurrent error detection systems of combinational logical circuits]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, vol. 4, no. 4, pp. 655–686. (In Russian)
18. *Efanov D. V. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V.* (2010) O svoistvakh koda s summirovaniyem v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [Properties of summation codes in concurrent error detection systems]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 6, pp. 155–162. (In Russian)
19. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V.* (2010) Predelniye svoistva koda s summirovaniyem [Limiting properties of summation codes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, no. 3, pp. 290–299. (In Russian)

20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. (2015) Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistematicheskikh kodov [Classification of errors in data vectors of systematic codes]. *Izvestiya vuzov. Priborostroeniye [Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering]*, vol. 58, no. 5, pp. 333–343. DOI: 10.17586/0021–3454–2015–58–5–333–343. (In Russian)
21. Efanov D. V. & Blyudov A. A. (2012) Kody Khemminga i ikh obnaruzhivayushchiye sposobnosti v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [Hamming codes and their detection ability in concurrent error detection circuits]. *Informatika i sistemy upravleniya [Information technology and control systems]*, no. 2, pp. 100–111. (In Russian)
22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. (2011) Veroyatnostniye svoistva koda s summirovaniyem v skhemakh funktsionalnogo kontrolya. Avtomatika i telemekhanika zheleznykh dorog Rossii. Tekhnika, tekhnologiya, sertifikatsiya. Sbornik nauchnykh trudov [Probabilistic properties of the summation code in concurrent error detection circuits. Automation and remote control of the Russian railways. Equipment, process engineering, certification. Collection of scientific papers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University Publ., pp. 3–13. (In Russian)
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. & Abdullaev R. B. (2018) Osobennosti organizatsii system funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh skhem na osnove polinomialnykh kodov [Organization of concurrent error detection systems of combinational circuits based on polynomial codes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, vol. 15, no. 3, pp. 432–445. (In Russian)
24. Busaba F. Y. & Lala P. K. (1994) “Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors”. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 5, iss. 1, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.
25. Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Goessel M. (1998) “Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs”, *VLSI Design*, vol. 5, iss. 4, pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
26. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. & Efanov D. (2017) Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017). Serbia, Novi Sad, pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085
27. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (2017) Usloviya obnaruzheniya neispravnosti logicheskogo elementa v kombinatsionnom ustroistve pry funktsionalnom kontrole na osnove koda Bergera [Conditions of error detection of a logical unit in a combinational device under concurrent error detection based on Berger code]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 5, pp. 152–165. (In Russian)
28. Berger J. M. (1961) A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, vol. 4, iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019–9958(61)80037–5.
29. Bose B. & Lin D. J. (1985) Systematic Unidirectional Error-Detection Codes. *IEEE Transaction on Computers*, vol. C-34, pp. 1026–1032.
30. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (2015) Primeneniye modulnykh kodov s summirovaniyem dlya postroeniya system funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem [Application of modular summation codes for the design of concurrent error detection systems of combinational logical circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 10, pp. 152–169. (In Russian)
31. Das D. & Toubia N. A. (1999) Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.

32. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. & Cherepanova M. R. (2016) Modulniye kody s summirovaniyem v sistemakh funktsionalnogo kontrolya. I. Svoistva obnaruzheniya oshibok kodamy v informatsionnykh vektorakh [Modular summation codes in concurrent error detection systems. I. Properties of error detection by codes in data vectors]. *Elektronnoye modelirovaniye [Electronic simulation]*, vol. 38, no. 2, pp. 27–48. (In Russian)
33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. & Cherepanova M. R. (2016) Modulniye kody s summirovaniyem v sistemakh funktsionalnogo kontrolya. II. Umensheniye strukturnoy izbytochnosti system funktsionalnogo kontrolya [Modular summation codes in concurrent error detection systems. II. The reduction of structure redundancy of concurrent error detection systems]. *Elektronnoye modelirovaniye [Electronic simulation]*, vol. 38, no. 3, pp. 47–61. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 29.04.2019, принята к публикации 13.06.2019*

*АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович* — аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;  
e-mail: ruslan\_0507@mail.ru

© Абдуллаев Р. Б., 2020

УДК 534.6.08

**Г. К. Зальцман, канд. техн. наук**

**А. П. Пронин, канд. техн. наук**

*Кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербурга*

## ИЗ ИСТОРИИ ЗВУКОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*(продолжение; начало в № 3, «Автоматика на транспорте», 2018)*

В первой части работы рассказывалось о методике проведения натурных экспериментов, с помощью которых были определены оптимальные параметры звуковых сигнальных устройств большой и малой громкости на локомотивах. На первом этапе исследовалось распространение звуков различных частот над железнодорожными путями. На втором — четкость восприятия этих звуков на фоне маскировки их характерными транспортными шумами. Однако значительно сложнее было создать «в железе» и испытать такие устройства, которые бы соответствовали поставленным требованиям. Решению этой задачи и посвящена предлагаемая ниже статья.

звуковые сигнальные устройства большой и малой громкости, звукомерная камера, сигнализатор язычкового типа, гиперболический рупор, направленность излучения, двухкамерный свисток направленного действия

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-89-103

### Введение

Первый этап работы заключался в создании устройства большой громкости, которое было бы четко слышно на фоне шумов, создаваемых механизмами при ремонте пути, поскольку путейцы, как показывает статистика, — основной контингент работников железнодорожного транспорта, находящихся в зоне риска наездов подвижного состава. Для этого авторы в Отраслевой лаборатории по борьбе с производственными шумами кафедры «Охрана труда» ЛИИЖТ спроектировали и соорудили специальную звукомерную заглушенную камеру [1]. В ней и проводились лабораторные испытания разработанных прототипов, в качестве которых выступали акустическая пушка, статическая сирена и запатентованный авторами двусторонний язычковый гудок.

Вторым этапом стала разработка сигнального устройства малой громкости направленного действия, т. е. такого прибора, у которого излучаемая энергия была бы сконцентрирована вдоль оси пути и не раздражала население, проживающее вблизи железной дороги.

## 1. Исследование способов генерации звуков большой мощности

Чтобы испытывать звуковые сигнальные устройства в лабораторных условиях, необходимо было спроектировать и создать специальную звукомерную камеру. Ее изготовили и установили в одном из помещений лаборатории.

Основные требования к заглушенной измерительной камере обычно таковы:

а) коэффициент звукопоглощения внутренних поверхностей камеры должен быть как можно ближе к единице, т. е.:

$$\frac{E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} = 1,$$

где  $E_{\text{пад}}$  — звуковая энергия, падающая на внутренние поверхности камеры;  $E_{\text{отр}}$  — отраженная звуковая энергия. При соблюдении этого условия звуковое поле внутри камеры приближается к свободному, так что измерения можно проводить в любой точке камеры;

б) звукоизоляция стен камеры должна быть достаточной для того, чтобы исключить влияние посторонних шумов на точность измерений.

Камера 2000x2000x1600 см (рис. 1) имела стены из двойного слоя сосновых досок (толщиной 40 см каждая), облицованных внутри двумя слоями звукопоглотителя.

Первый от стены слой состоит из технического войлока толщиной 40 мм, второй (толщиной 80 мм) образован матами из распушенного капронового волокна (длина волокон 50–70 мм, толщина отдельных волокон 35–40 мк). Маты укреплены волнообразно в виде полуцилиндров радиусом 100 мм. Это создает внутри камеры дополнительные рассеивающие поверхности, повышая

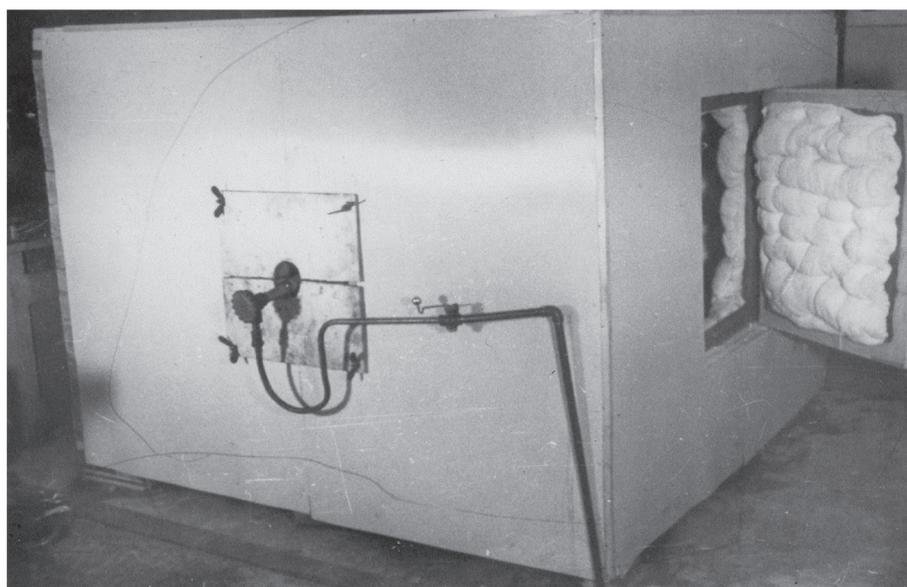


Рис. 1. Общий вид звукомерной камеры

тем самым общий коэффициент поглощения. Головка сигнального устройства, помещенного в камеру, выступает наружу — это дает возможность регулировать его в процессе работы.

Микрофон помещается в точке с наименьшей неравномерностью поля на специальном кронштейне. Кабель, проведенный через специальный ввод, позволяет помещать микрофон в любой точке камеры. Структурные помехи через пол камеры ослаблялись с помощью комбинированных резинометаллических амортизаторов, на которых располагалась камера.

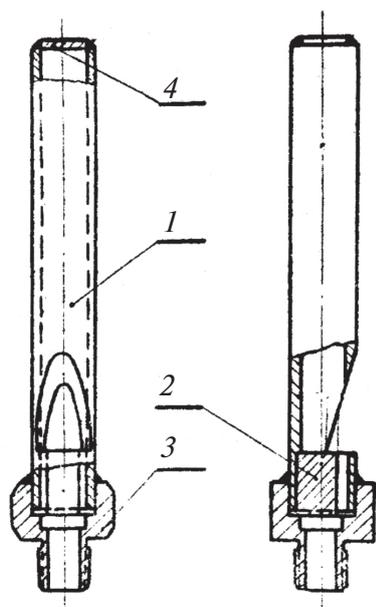
Исследование звукового поля в камере посредством точечного источника показало, что при удалении от точки измерений в два раза уровни звукового давления увеличиваются не менее чем на 6,5 дБ, а при увеличении этого расстояния в два раза они уменьшаются на 5 дБ. В соответствии с действовавшими на то время нормативными документами данную звукомерную камеру можно было считать удовлетворительной. В качестве точечного источника использовалась головка рупорного громкоговорителя. Линейные размеры ее устья намного меньше длины волн во всем диапазоне частот исследуемого поля. Кривые спада звукового давления, снятые при помощи точечного источника, расходились с вычисленными по закону обратной пропорциональности не более чем на  $\pm 3$  дБ. Уровень собственного шума в камере днем (при наличии внешних помех) не превышал 50 дБ.

При измерении акустических параметров сигнальных устройств микрофон устанавливался в точке наименьшей неравномерности поля — в 100 см от среза рупора испытываемого устройства.

Чтобы определить возможности использования различных типов известных излучателей звука в качестве сигнальных устройств большой громкости на локомотивах, авторы исследовали как существующие экземпляры, так и специально созданные для этой цели экспериментальные образцы. Известно, что любой звуковой сигнализатор, как правило, состоит из генератора звука и согласующего элемента [2]. Генератор звука преобразует механическую, электрическую, тепловую и др. энергию в звуковую. Согласующий элемент служит для связи акустического сопротивления генератора с акустическим сопротивлением окружающей среды. В зависимости от основного признака генераторы звука можно разделить на два класса: по виду потребляемой энергии и по виду преобразователя.

По виду потребляемой энергии звуковые сигнальные устройства локомотивов используются исключительно пневматические. По виду преобразователя они делятся на свистки, тайфоны (мембранные), клапанные, язычковые, сирены, диафоны (поршневые).

Свисток — простейший генератор звука. Его существенные преимущества — простота конструкции, отсутствие движущихся частей и необходимости настройки [3]. Типовой свисток локомотива представляет собой миниатюрную органную трубу, закрытую с одного конца, которая возбуждается на открытом конце струей воздуха, протекающего вдоль одной из боковых стенок (рис. 2).



**Рис. 2.** Стандартный свисток локомотива:  
1 — корпус;  
2 — пробка; 3 — штуцер;  
4 — заглушка

Струя, ударяющаяся о заостренный край противоположной стороны излучающего отверстия, довольно неустойчива. Это создает благоприятные условия для колебательного движения перпендикулярно направлению струи.

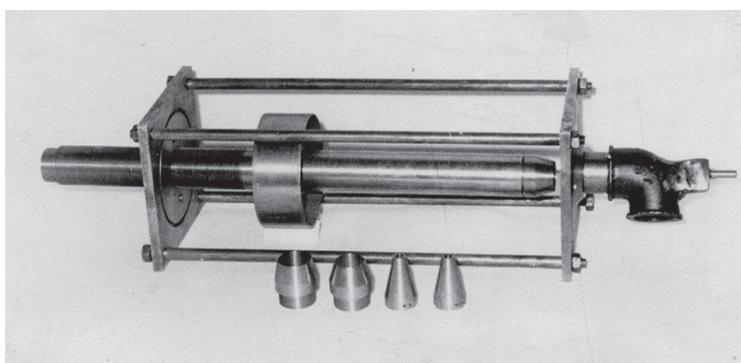
Длина получаемой свистком звуковой волны равна учетверенной длине свистка, т. е. частота излучаемого тона

$$f = \frac{C}{4l},$$

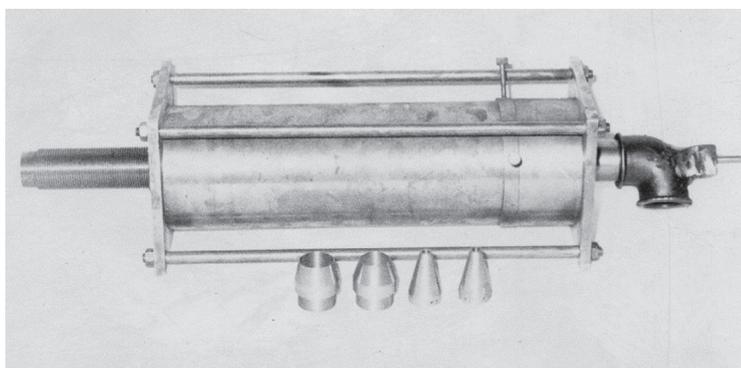
где  $C$  — скорость звука;  $l$  — длина трубки.

КПД свистка, как правило, не превышает 1%. Вместе с тем конструкция свистка не позволяет использовать согласующие элементы, посредством которых можно было бы повысить его эффективность.

Для изучения возможности применения свистка в качестве мощного аварийного сигнализатора был создан усовершенствованный свисток с дополнительным резонатором и кольцевым соплом — «акустическая пушка» (рис. 3, 4).



**Рис. 3.** «Акустическая пушка» со снятым резонатором и набором насадок



**Рис. 4.** «Акустическая пушка» в комплекте с резонатором

В качестве согласующего элемента бралась полуволновая открытая труба. Акустические испытания данной модели (как и всех последующих) производились в заглушенной камере с помощью комплекта прецизионной аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» (рис. 5). Результаты испытаний были представлены в виде спектрограмм.

Давление в питающей магистрали постоянно поддерживалось на одном уровне ( $7 \text{ кГ/см}^2$ ), что соответствует среднему давлению в магистрали локомотивов.

Испытания модели «акустической пушки» показали, что для частот, на которые должны рассчитываться сигнальные устройства большой громкости (100–400 Гц), габариты пушки и ее вес весьма велики, а акустическая мощность незначительна; звуковое давление на основной частоте при расстоянии в 1 м составляет 83 дБ, остальная мощность приходится на гармоники. Если давление воздуха превышает некоторое пороговое значение, в питающей магистрали наблюдается эффект «передувания» и устройство начинает работать на одной из высших гармоник.

Испытания показали, что использовать подобные свистки в качестве аварийных сигнализаторов большой громкости нецелесообразно, а применение их для подачи сигналов малой громкости возможно только при существенном изменении конструкции.

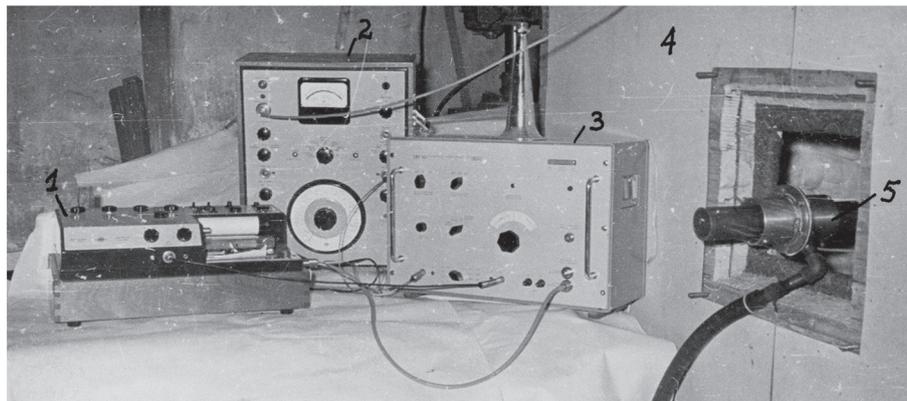
Затем был создан и испытан модифицированный свисток с дополнительным резонатором.

Будучи снабжен дополнительным резонатором, он уже не является свистком в чистом виде, а представляет собой статическую сирену, работающую по принципу прерывания струи. Дополнительный резонатор должен работать синхронно с основным, тогда струя из сопла будет попеременно попадать внутрь основного или дополнительного резонатора с частотой, равной частоте их основной настройки. В результате достигается модуляция воздушной струи. Созданная авторами экспериментальная модель статической сирены была снабжена регулируемым соплом, что давало возможность настраивать его на любой тон (рис. 6).

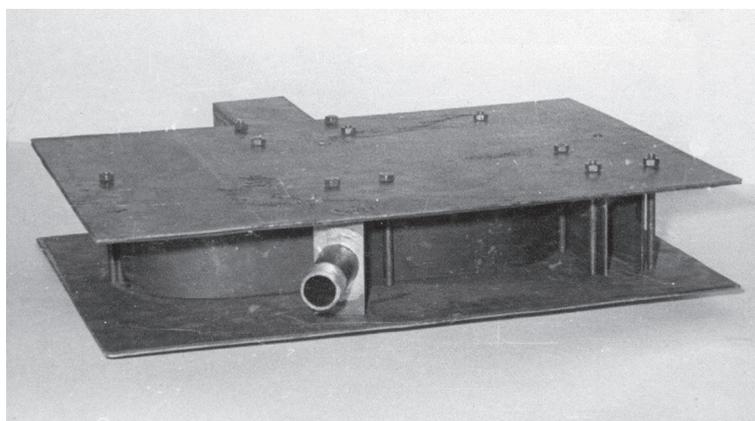
Мощность, полученная в эксперименте, оказалась значительной: суммарное звуковое давление на расстоянии 1 м равнялось 128 дБ. Однако такая сирена не лишена недостатков. К ним относятся, прежде всего, большие габариты для создания сигналов низких частот и повышенный расход воздуха. В качестве сигнализаторов большой громкости эти устройства нецелесообразны, но как сигнализаторы малой громкости они весьма перспективны, поскольку позволяют ориентировать излучаемую энергию в желаемом направлении.

На рисунке 7 показан спектр звука статической сирены.

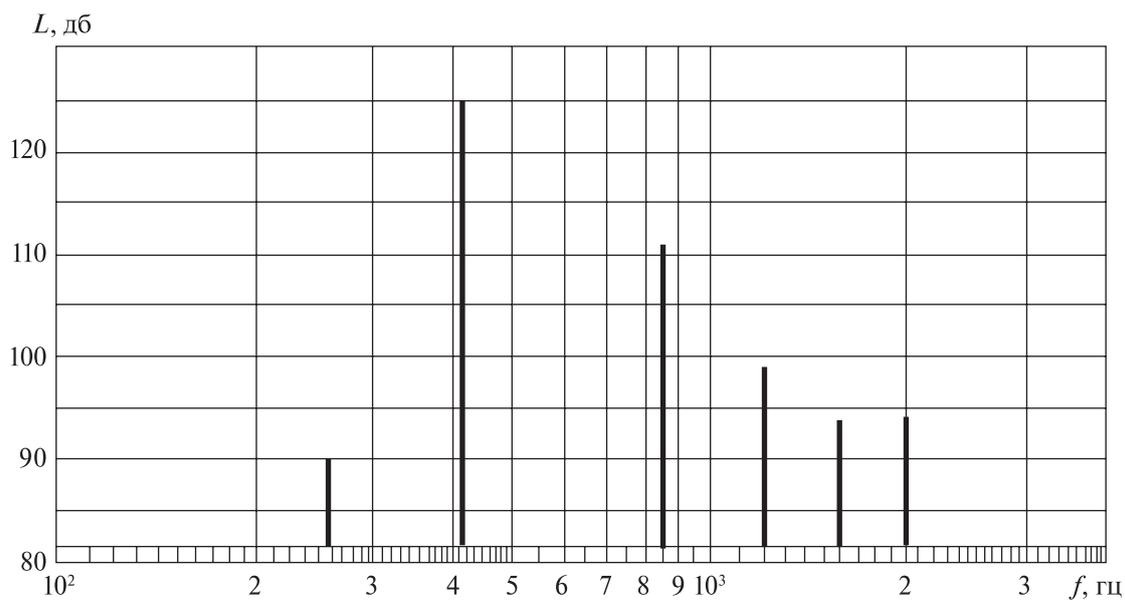
Излучатели звука мембранного типа (тайфоны) — единственные сигнализаторы, применяемые на локомотивах в качестве сигнальных устройств большой громкости. Существенными достоинствами их являются большая мощность излучения при сравнительно неглубоких габаритах и весе и простота устройства.



**Рис. 5.** Комплект измерительной аппаратуры: 1 — самописец; 2 — спектрометр; 3 — генератор стандартных частот; 4 — камера; 5 — испытываемое устройство



**Рис. 6.** Статическая сирена



**Рис. 7.** Спектр звука статической сирены

Применение этих сигнализаторов затрудняется необходимостью регулировки в процессе эксплуатации и частой замены мембраны, вследствие чего вместо стандартных стальных или бронзовых мембран применяют всевозможные суррогаты (капрон, гетинакс и т. п.). А это, в свою очередь, изменяет тональность, затрудняет распознавание сигнала на фоне маскирующих шумов.

Сирена (известный тип звукового сигнализатора) обладает очень высокой акустической мощностью и высоким КПД. При этом использование сирен на железнодорожном транспорте затрудняется сложностью их конструкции, необходимостью иметь механический привод, невозможностью подачи сигналов по коду (отсутствием четкости начала и конца сигнала) и крупными габаритами.

Диафон — поршневой излучатель с приводом от специального двигателя, который смонтирован на одной оси с поршнем. Это очень мощный сигнализатор, его сигнал имеет четкие начало и конец. Основной недостаток — сложность конструкции и наличие скользящих частей, в которых должны предусматриваться минимальные зазоры, чтобы исключить утечку воздуха и потерю мощности. К тому же габариты диафона и вес сравнительно с тайфоном значительны. Поэтому использование диафона в условиях железнодорожного транспорта нецелесообразно.

## 2. Разработка нового сигнализатора язычкового типа

Проведенные исследования показали, что необходимо найти другой излучатель, который бы имел малые габариты при высокой мощности излучаемого звука, стабильные акустические характеристики и (что существенно важно для локомотива) небольшой расход воздуха. Поиски такого устройства привели авторов к созданию двустороннего излучателя язычкового типа [4].

На рисунке 8 показан принцип работы такого устройства.

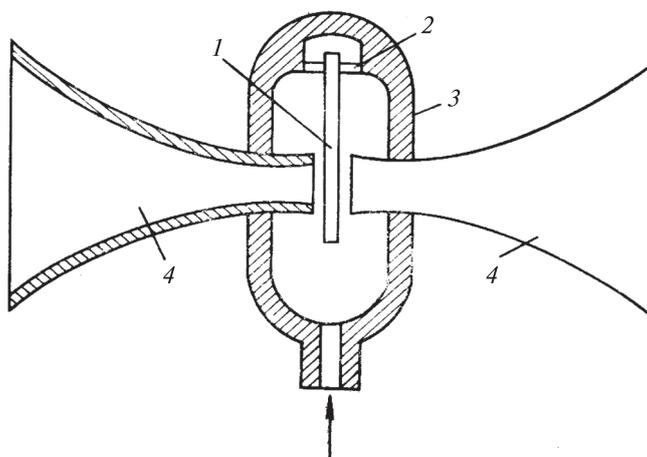


Рис. 8. Излучатель язычкового типа

В корпусе (3) на штифтах (2) свободно подвешен язычок (1), нижний конец которого находится между двумя горловинами рупоров (4).

Первоначально язычок находится в каком-то среднем положении. При подаче воздуха вследствие флуктуации давления он начинает двигаться к одной из горловин. Чем ближе к ней язычок, тем больше разность давлений по обе стороны и тем быстрее он стремится к горловине. В конце концов горловина захлопывается. Возникающая в рупоре пучность давления снова открывает горловину и перебрасывает язычок ко второму рупору, где процесс повторяется. Так возникают устойчивые колебания, частота которых зависит от параметров рупора и объема воздуха в корпусе. При этом через оба рупора излучаются звуки большой интенсивности.

Ранее упоминалось, что кроме самого излучателя в любом сигнализаторе необходим согласующий элемент — рупор. Рупоры могут иметь различную конфигурацию, от самой простой, где изменение сечения от устья до горловины меняется по линейному закону, до гиперболической, экспоненциальной, катеноидальной и т. п. Авторы провели многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по подбору наиболее эффективного рупора для язычкового излучателя. Ввиду их чрезвычайной громоздкости и малой информативности мы не будем на них останавливаться. Упомянем только, что рупор можно рассматривать как акустический трансформатор, коэффициент трансформации которого  $n$  есть соотношение сечений устья и горловины рупора, а КПД зависит от закона, по которому изменяется сечение при переходе от горловины к устью. Наибольшую эффективность показал рупор, сечение которого изменяется по гиперболическому закону, т. е. на любом расстоянии от горловины рупора пло-

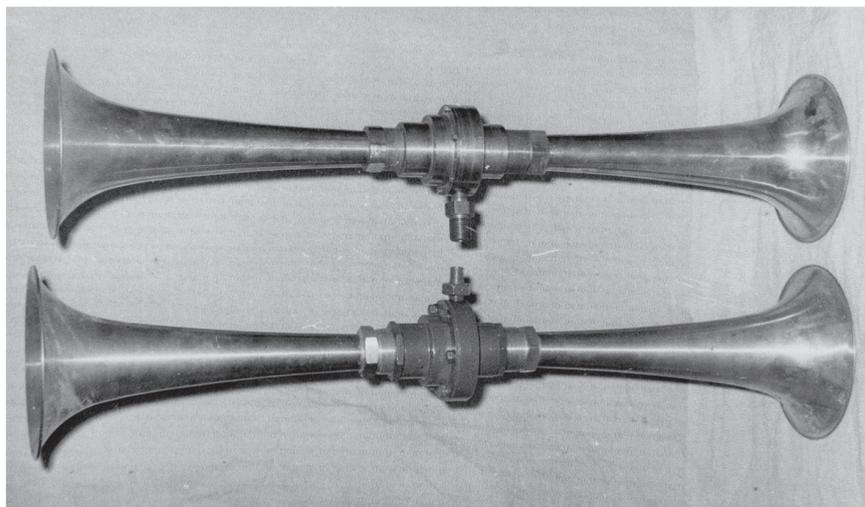
щадь сечения текущей координаты  $S_x = \frac{S_1 l^2}{\left[ x \left( \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} - 1 \right) + l \right]^2}$ ,

где  $0 \leq x \leq l$ ;  $S_1$  — площадь сечения горловины;  $S_2$  — площадь сечения устья;  $l$  — длина рупора.

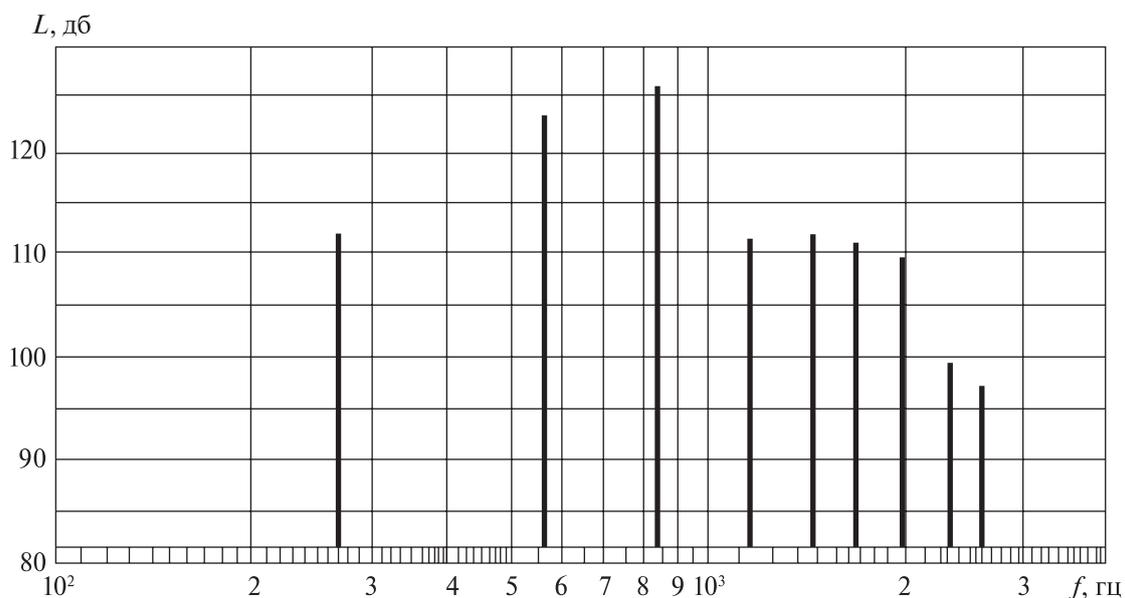
Этот прибор и был принят за основу. В результате был спроектирован и создан «в железе» сигнализатор, показанный на рисунке 9. Изначально предполагалось разместить сигнализаторы на скоростном электропоезде «ЭР-200», поэтому они были изготовлены в двух экземплярах, для «головы» и «хвоста» поезда.

Один из сигнализаторов был установлен на магистральном локомотиве, приписанном к локомотивному депо «Ховрино» Октябрьской железной дороги. Его испытания показали, что полученные характеристики близки к расчетным, заложенным при проектировании. Спектр звука показан на рисунке 10, а в таблице 1 представлены сравнительные результаты испытаний стандартного гудка локомотива и предложенного сигнализатора.

Как видно из приведенных материалов, экспериментальный сигнализатор превосходит типовой как по громкости звучания, так и по экономичности.



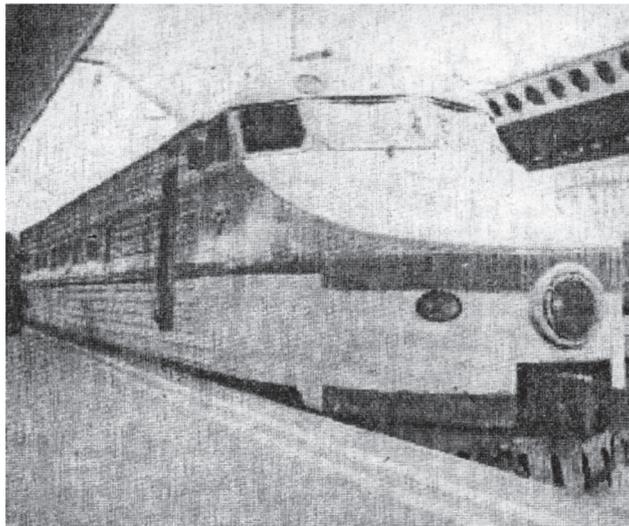
**Рис. 9.** Экспериментальные звуковые сигнализаторы язычкового типа с гиперболическим рупором



**Рис. 10.** Спектр звука экспериментального сигнализатора

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики типового тайфона магистрального локомотива и экспериментального сигнализатора

Тип сигнализатора	Уровень звукового давления на расстоянии 1 м, L дБ	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	Затраченная мощность, кВт	Акустическая мощность, Вт
Типовой тайфон	125	0,037	7,15	41,7
Экспериментальный сигнализатор	132	0,023	4,8	212



**Рис. 11.** Экспериментальный сигнализатор на крыше сверхскоростного поезда «ЭР-200»

После обкатки на магистральном локомотиве сигнализаторы были установлены на сверхскоростном электропоезде «ЭР-200», курсировавшем между Ленинградом и Москвой. У авторов не сохранилось фотографий сигнализатора, установленного на крыше поезда. Исключение составляет снимок плохого качества с обложки одного из журналов (рис. 11) [6], поскольку сигнализаторы очень скоро были убраны под кузов. К сожалению, дальше опытной эксплуатации электропоезда дело не пошло, и сигнализаторы, как и весь электропоезд, имевший много передовых для своего времени технических решений, были преданы забвению.

### **3. Разработка сигнального устройства малой громкости направленного действия**

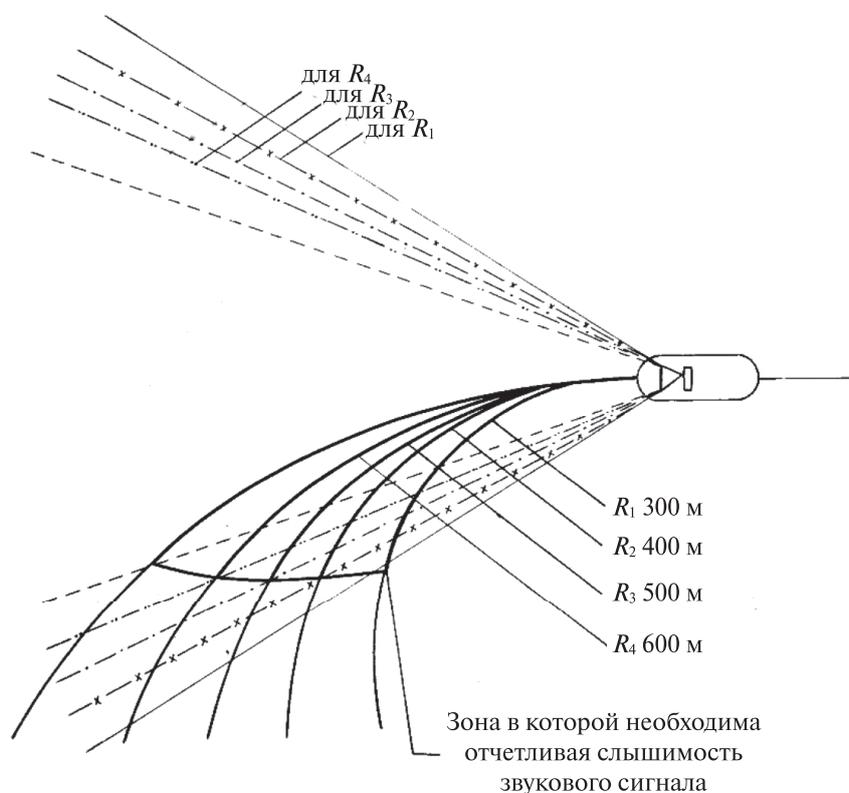
Как уже упоминалось в первой части работы, на железнодорожных станциях и перегонах, расположенных в черте крупных городов и населенных пунктов, курортов и т. п., звуковые предупредительные сигналы должны подаваться с помощью устройства малой громкости, т. е. свистка [7].

Однако в силу малых размеров выходного отверстия типового свистка (рис. 2) звуки, им излучаемые, распространяются во все стороны от железнодорожного полотна. Кроме того, высокая частота излучаемых тонов имеет значительно большее раздражающее воздействие, чем у сигнализатора большой громкости, в связи с чем жалобы населения на эти сигналы, особенно ночью, продолжают и по сей день. В связи с изложенным Министерство путей сообщения СССР поручило Отраслевой лаборатории по борьбе с производственными шумами ЛИИЖТ разработать звуковое сигнальное устройство малой громкости, которое обладало бы минимальным раздражающим воздействием, но в то же

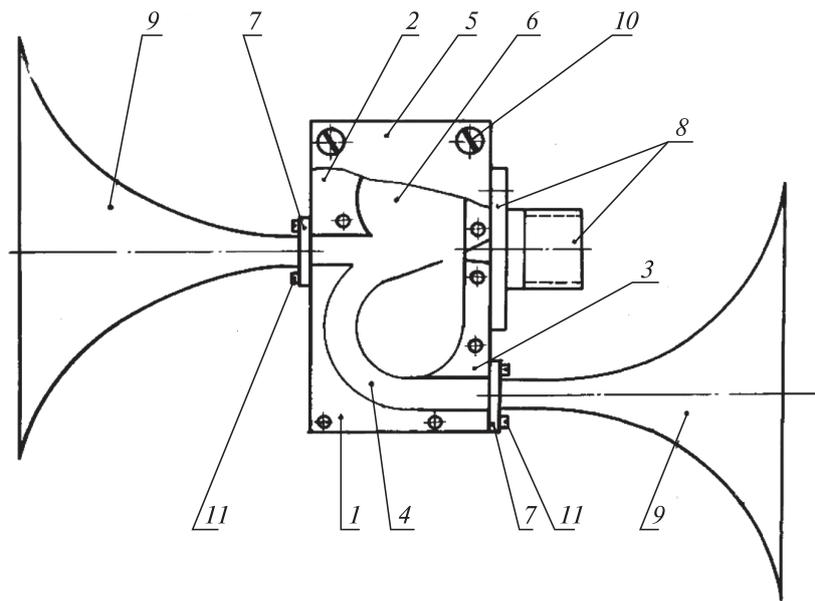
время отчетливо было слышно на железнодорожных путях. Необходимо было создать свисток направленного действия, звук которого концентрировался бы вдоль железнодорожного полотна, тем более что авторы уже имели опыт в этом направлении [8]. Естественно, нельзя создать акустический излучатель, звук которого распространялся бы в виде узкого луча, т. к. звуковые волны постепенно рассеиваются в пространстве за счет дифракционных и интерференционных процессов. Впрочем, такая узкая направленность звукового сигнала локомотива и не нужна, поскольку на кривых этот звук должен быть также четко слышен. Таким образом, «звуковой луч», если можно так выразиться, должен иметь вид конуса с углом при вершине, определяемым скоростью движения поезда и радиусом кривой. Поскольку оба параметра — величины довольно вариативные, был выбран некий средний вариант.

На рисунке 12 показаны зоны, в которых требуется четкая слышимость свистка локомотива при разных радиусах кривых.

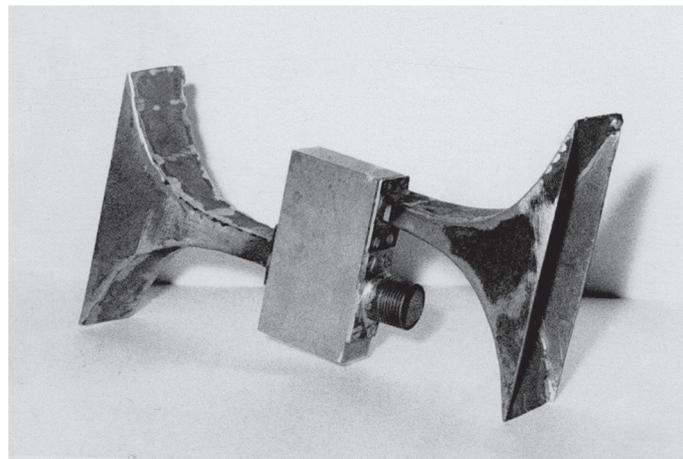
Как было сказано выше, самый подходящий излучатель для сигналов малой громкости — статическая сирена, поскольку ее можно снабдить рупором, который обеспечит высокий КПД и необходимую направленность излучения. Эта конструкция и была принята за основу. На рисунке 13 показана конструкция такой сирены, а на рисунке 14 — ее общий вид.



**Рис. 12.** Зоны, в которых необходима четкая слышимость свистка локомотива в зависимости от радиуса кривых



**Рис. 13.** Статическая сирена как сигнал малой громкости в разрезе:  
 (1, 2, 3 — внутренние объемы; 4 — улитка; 5 — крышка;  
 6 — дополнительный резонатор; 7 — фланец рупора; 8 — воздуховод;  
 9 — рупор; 10 — крепление крышки; 11 — крепление фланца рупора)



**Рис. 14.** Статическая сирена как сигнал малой громкости (общий вид)

Для испытаний статическая сирена была установлена на маневровом локомотиве — так, чтобы широкая часть рупора была расположена горизонтально (рис. 15).

Натурные измерения показали, что уровень звукового давления статической сирены по оси пути на 8 дБ выше, чем у стандартного свистка, что по субъективному ощущению означает увеличение громкости в 2,5 раза. В направлении, перпендикулярном оси пути, уменьшение звукового давления по сравнению



**Рис. 15.** Статическая сирена на крыше маневрового локомотива

со стандартным свистком составило 12 дБ, что означает снижение субъективно ощущаемой громкости в 3,6 раза [9]. Эксплуатация статической сирены на маневровом локомотиве показала его устойчивую работу независимо от климатических условий. К сожалению, объективные причины, в т. ч. трудности с поиском предприятия, которое способно изготовить хотя бы предсерийное количество статических сирен, не позволили продолжить работы в данном направлении.

### **Заключение**

Широкомасштабные исследования, о которых сообщалось в первой части статьи, позволили выработать акустические критерии, которым должны соответствовать звуковые сигналы современных локомотивов. Не менее сложной, а подчас и почти невыполнимой задачей было создание реальных образцов сигнальных устройств, отвечающих этим требованиям. Работа состояла из двух этапов.

Первый этап предполагал создание устройства большой громкости, звук которого был бы четко слышен на фоне интенсивного шума путевых механизмов. Было проанализировано большое количество излучателей звука, пригодных для этой цели. Авторы разработали и запатентовали двусторонний излучатель нового типа, позволивший создать принципиально новый сигнализатор, намного превосшедший по громкости существующие отечественные и зарубежные аналоги. Испытания на сверхскоростном электропоезде «ЭР-200» показали его высокую надежность.

На втором этапе необходимо было разработать свисток — устройство малой громкости, которое было бы хорошо слышно вдоль оси пути, но значительно слабее в перпендикулярном направлении, чтобы не беспокоить население, проживающее вблизи железной дороги. За основу была взята статическая сирена с дополнительным резонатором, снабженная двумя рупорами, — это позволяет одновременно подавать сигналы в прямом и обратном направлениях, что чрезвычайно важно при проведении маневровых работ. Испытания показали, что такая сирена позволяет увеличить (по сравнению со стандартным свистком локомотива) громкость сигнала вдоль оси пути в 2,5 раза и в то же время ослабить эту громкость в перпендикулярном направлении в 3,6 раза.

### Библиографический список

1. *Зальцман Г. К., Пронин А. П.* Малая заглушенная камера для акустических измерений. *Технология и организация производства.* № 3. — М., 1970. — С. 17–19.
2. *Харкевич А. А.* Автоколебания. Издательство технической и теоретической литературы. — М., 1954. — 174 с.
3. *Скучик Е.* Основы акустики. Т 1. Издательство иностранной литературы. — М., 1954. — 510 с.
4. *Зальцман Г. К., Пронин А. П.* Пневматический звуковой сигнализатор. Авторское свидетельство № 341182 от 27.02.1972.
5. *Кузнецов Л. А.* Акустика музыкальных инструментов. — М., 1989. — 367 с.
6. *Инженер путей сообщения.* — Л., 1996. — № 3. — 44 с.
7. *Инструкция по сигнализации на железных дорогах Союза ССР.* — М., Транспорт, 1978. — 184 с.
8. *Денисенко Н. А., Зальцман Г. К., Пронин А. П.* О некоторых практических мероприятиях по уменьшению шума промышленной вентиляции в районах жилой застройки. Тезисы докладов VII Всесоюзной акустической конференции. — Л., 1971. — С. 147–148.
9. *Zwicker E., Feldkeller R.* Das Ohr als Nachrichtempfänger. Stuttgart. Hirzel Verlag. — 1967. — 262 p.

**G. K. Zal'tsman**

**A. P. Pronin**

*Department of «Technosphere and Environmental Safety»,  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg*

### A HISTORICAL INTRODUCTION TO THE SOUND SIGNALING ON RAILWAY TRANSPORT

*(continued; beginning in No. 3, Automation on Transport, 2018)*

The first part of the article described the methodology for full-scale experiments conducted to determine optimal parameters of high — and low-volume sound signalling devices of locomotives. At the first stage, the propagation of sounds of various frequencies over railway tracks was studied. The clarity of perception of these sounds against the background of their masking by a characteris-

tic transport noise was studied at the second stage. However, it was much more difficult to create a hardware and test such devices that would meet the set requirements. The article below describes the solution of this problem.

high- and low-volume sound signalling devices, sound-measuring camera, reed-type signalling device, hyperbolic horn, radiation pattern, directional two-chamber whistle

## References

1. *Zal'tsman G. K. & Pronin A. P. (1970) Malaya zaglushyonnaya kamera dlya akusticheskikh izmereniy. Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva [Small damped chamber for acoustic measurements. Technology and production organization]. Moscow, no. 3, pp. 17–19. (In Russian)*
2. *Kharkevich A. A. (1954) Avtokolebaniya [Self-oscillations]. Izdatel'stvo tekhnicheskoy i teoreticheskoy literatury [Publishing House of Technical and Theoretical Literature]. Moscow, 174 p. (In Russian)*
3. *Skuchyk E. (1954) The foundations of acoustics. Vol. 1. Foreign Languages Publishing House. Moscow, 510 p. (In Russian)*
4. *Zal'tsman G. K. & Pronin A. P. (1972) Pneumatic horn. Inventor's certificate No. 341182 dated February 27, 1972. (In Russian)*
5. *Kuznetsov L. A. (1989) Akustika muzykal'nykh instrumentov [Acoustics of musical instruments]. Moscow, Legpromizdat Publ., 367 p. (In Russian)*
6. *(1996) Inzhener putey soobshcheniya [Railway engineer]. Leningrad, no. 3, 44 p. (In Russian)*
7. *(1978) Instruksiya po signalizatsii na zheleznykh dorogakh Soyuza SSR [Instructions for signalling on the USSR railways]. Moscow, Transport Publ., 184 p. (In Russian)*
8. *Denisenko N. A., Zal'tsman G. K. & Pronin A. P. (1971) O nekotorykh prakticheskikh meropriyatiyakh po umen'sheniyu shchima promyshlennoy ventilyatsii v rayonakh zhiloy zastroyki. Tezisy dokladov VII Vsesoyuznoy akusticheskoy konferentsii [On certain practical measures to reduce the noise of industrial ventilation in residential areas. Abstracts of the VII All-Union Acoustic Conference]. Leningrad, pp. 147–148. (In Russian)*
9. *Zwicker E. & Feldkeller R. (1967) Das Ohr als Nachrichtempfänger. Stuttgart. Hirzel Verlag, 262 p.*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным  
Поступила в редакцию 09.10.2019, принята к публикации 02.03.2020*

*ЗАЛЬЦМАН Геннадий Константинович* — кандидат технических наук, профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

*ПРОНИН Анатолий Павлович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;  
e-mail: pronin56@yandex.ru

© Зальцман Г. К., Пронин А. П., 2020

УДК 002.55:[625+681.5]

**В. В. Сапожников, докт. техн. наук**

**Вл. В. Сапожников, докт. техн. наук**

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

**Д. В. Ефанов, докт. техн. наук**

*ООО «ЛокоТех-Сигнал»,  
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,  
Российский университет транспорта, Москва*

### **ЖУРНАЛУ «АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ» ПЯТЬ ЛЕТ**

«Автоматика на транспорте» — один из немногих журналов в России, который основан и курируется одной кафедрой вуза. 2019 год стал для журнала пятым в его истории. В статье идеологи журнала рассуждают об исторических аспектах его создания, результатах деятельности, основных вопросах, освещаемых на его страницах, тенденциях дальнейшего развития. Приведены некоторые статистические данные о публикационной активности издания и его авторов, а также информация из базы данных Российского индекса научного цитирования.

периодические издания, журнал, автоматика на транспорте, показатели публикационной активности

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-104-113

### **Введение**

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I славится богатыми традициями. С самого основания кафедры в 1930 году и до настоящего времени в ее лабораториях исследуются и разрабатываются передовые технологии автоматизации производственных процессов на железных дорогах [1].

Несомненно, достижения сотрудников кафедры в области автоматике и телемеханики должны освещаться в специальных изданиях, что позволяет не только определить роль кафедры в развитии науки и техники, но и дать научному миру представление о современных (на определенном этапе и в определенный период) технологиях автоматизации для железных дорог. С 1963 по 2014 годы одним из «вестников научной мысли» кафедры служил традиционно выпускаемый раз в один-два года сборник трудов. Всего за это время было издано 33 сборника,

включающих более полутысячи статей, авторами которых стало свыше трехсот ведущих специалистов в области автоматики, телемеханики и вычислительной техники [2]. Сборник трудов кафедры прошел через несколько поколений ученых и инженеров-исследователей, а многие вопросы, затронутые на его страницах, до сих пор не утратили актуальности.

Особый статус сборник приобрел в 10-х годах XXI столетия при тогдашнем заведующим кафедрой профессоре Вл. В. Сапожникове. Именно тогда ответственные за выпуск обратили внимание на ключевые недостатки изданий в виде сборника трудов. Главным минусом являлось издание сборника в «твердой копии», без возможности его простого и удобного распространения в быстро развивающемся интернет-пространстве. Сборник выходил ограниченным тиражом, в основном его копии в штучном количестве выдавались авторам, один или два экземпляра помещались в университетскую библиотеку, а оставшиеся направлялись на кафедры родственных вузов и оседали в книжных шкафах. И это самая главная потеря для инженеров-разработчиков, исследователей, сотрудников вузов и научных заведений в области автоматизации на транспорте всей страны, поскольку путь, пройденный сотрудниками кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», необходимо было проделывать заново, а не развивать уже достигнутое. Важен и аспект, связанный с современными способами учета публикационной активности и качества изданий: сборник, естественно, не индексировался ни в одной научной базе и не засчитывался в актив ни сотрудникам, ни кафедре, никак не влиял на общеизвестные рассчитанные показатели научной деятельности. Требования к публикациям в сборниках трудов были настолько «ослабленными», что зачастую статья содержала только основную идею и результаты автора, без сравнения с результатами других исследователей, анализа современных мировых достижений предметной области статьи и т. д.

При издании сборников трудов кафедры 2011, 2012, 2013 и 2014 годов постепенно повышались требования к оформлению материалов статей и качеству представляемых результатов, что вело к повышению привлекательности самого сборника. Однако его широкое распространение оказалось затруднено в силу особенностей индексации статей в российские наукометрические базы. Тем не менее, частично сборники тех лет индексированы в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и в полном объеме в научную электронную библиотеку с открытым доступом «Киберленинка». Тогда это стало «локальным прорывом»: научные результаты сделались доступными широкому кругу читателей. А интерес к сборнику начал расти и выходить за пределы отдельно взятой кафедры и одного направления автоматики и телемеханики железных дорог.

В 2014 году было принято принципиальное решение о создании периодического издания — журнала. У этой идеи были как противники, так и сторонники. Изначально предполагалось, что журнал будет выпускаться раз в год

под единым названием и иметь сквозную нумерацию по годам. Такая модификация сборника была весьма естественной, а процесс издания оказался бы «безболезненным». Ответственные лица кафедры провели ряд консультаций со специалистами в области периодических изданий, в том числе с директором издательства университета Л. А. Карпичевой, и приняли решение сразу «поднять планку»: издавать журнал, зарегистрированный во всех необходимых инстанциях, индексируемый в базу данных РИНЦ, с прицелом на скорое вхождение в Перечень ВАК РФ, с политикой полной открытости публикаций на *безвозмездной основе*. Журнал получил название «Автоматика на транспорте», а его главным редактором стал доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации В. В. Сапожников, заместителем главного редактора — доктор технических наук, профессор А. Б. Никитин, ответственным секретарем — кандидат технических наук Д. В. Ефанов.

### 1. Обзор основных результатов работы журнала

Журнал «Автоматика на транспорте» предназначен для полного освещения научных и практических достижений в области автоматического и автоматизированного управления на транспорте. Темы и рубрики журнала охватывают широкий круг вопросов, связанных с автоматикой, информатикой и вычислительной техникой, а также организацией и управлением движения на транспорте (не только железнодорожном). Пройдя почти трехлетний путь издания, журнал 18 декабря 2017 года был включен в Перечень ВАК РФ: начиная с № 4 за 2017 год все выпуски «одобрены» ВАК РФ. Авторы многих статей впоследствии защитили кандидатские и докторские диссертации, ряд исследователей готовится к защите.

Сегодня журналу исполняется пять лет. Выпущено 20 номеров, разбитых на пять томов по годам издания. Всего в «Автоматике на транспорте» за эти годы опубликовано 170 статей (в среднем 34 статьи в год и 8,5 статьи в номере), а авторами стали 174 ученых, специалиста и инженера-исследователя. Статьи распределяются по рубрикам:

- «Автоматизация проектирования»;
- «В порядке дискуссии»;
- «Живучесть, надежность, безопасность»;
- «Из истории автоматике»;
- «Интеллектуальные системы управления»;
- «Краткие сообщения»;
- «Техническая диагностика и контролепригодные системы»;
- «Системы управления на транспорте»;
- «Стандартизация и сертификация»;
- «Методы мониторинга в транспортных системах»;
- «Электронное моделирование»;

- «Управление в технических системах»;
- «Эксплуатация транспортных систем».

Некоторые из рубрик в процессе развития журнала исчезли, оказавшись невостребованными. Так, в рубрике «Теоретические вопросы автоматики и информатики» за пять лет опубликована всего одна статья. Другие, напротив, были добавлены вследствие их важности для отрасли. К ним относятся «Управление в технических системах» и «Эксплуатация транспортных систем».

В таблице 1 представлены статистические данные о количестве публикаций в различных рубриках журнала. Наиболее популярными можно считать «Системы управления на транспорте», «Методы мониторинга в транспортных системах», «Техническая диагностика и контролепригодные системы» и «Электронное моделирование». В каждой опубликовано два десятка и более статей, а общая доля материалов, приходящихся именно на эти рубрики, от всех помещенных в журнале составляет 56,9 %.

В «Автоматике на транспорте» разместили свои работы более сотни авторов, однако наиболее активными стали 18 исследователей, каждый из которых опубликовал пять и более научных работ. В таблице 2 приведены данные

**Таблица 1.** Данные о числе публикаций в рубриках журнала

Позиция в рейтинге	Рубрика	ВСЕГО	% от общего числа статей
1	Системы управления на транспорте (до 2019 — Системы и устройства автоматики и телемеханики)	31	18,24
2	Методы мониторинга в транспортных системах (до 2019 — Техническая диагностика и прогнозирование)	25	14,71
3	Техническая диагностика и контролепригодные системы (до 2019 — Проектирование и тестирование логических устройств)	22	12,8
4	Электронное моделирование	19	11,18
5	Интеллектуальные системы управления	17	10
6	Из истории автоматики	16	9,41
7	Живучесть, надежность, безопасность	14	8,23
8	Автоматизация проектирования	8	4,7
9	Стандартизация и сертификация	6	3,53
10	Эксплуатация транспортных систем	6	3,53
11	В порядке дискуссии	3	1,76
12	Краткие сообщения	1	0,59
13	Теоретические вопросы автоматики и информатики	1	0,59
14	Управление в технических системах	1	0,59
Всего		170	100

**Таблица 2.** Данные о публикационной активности авторов

Позиция в рейтинге	Автор	ВСЕГО	$\eta$	$\pi$ , %
1	Ефанов Д. В.	23	1,15	13,529
2	Сапожников В. В.	12	0,6	7,059
3	Сапожников Вл. В.	12	0,6	7,059
4	Булавский П. Е.	10	0,5	5,882
5	Седых Д. В.	10	0,5	5,882
6	Лупал Н. В.	10	0,5	5,882
7	Никитин А. Б.	10	0,5	5,882
8	Марков Д. С.	9	0,4	4,706
9	Ковкин А. Н.	8	0,4	4,706
10	Василенко М. Н.	6	0,3	3,529
11	Зуев Д. В.	6	0,3	3,529
12	Гордон М. А.	6	0,3	3,529
13	Шаманов В. И.	6	0,3	3,529
14	Кокурин И. М.	6	0,3	3,529
15	Бубнов В. П.	5	0,25	2,941
16	Манаков А. Д.	5	0,25	2,941
17	Осадчий Г. В.	5	0,25	2,941
18	Наседкин О. А.	5	0,25	2,941

о количестве публикаций авторов, а также статистические показатели, характеризующие долю публикаций в пересчете на один выпуск журнала и долю публикаций в пересчете на общее количество опубликованных в журнале статей (показатели  $\eta$  и  $\pi$  соответственно). Среди имен, присутствующих в данном списке, значатся ведущие специалисты в области автоматизации технологических процессов на железнодорожном транспорте. Именно эти ученые развивали и развивают самые значимые направления отрасли, включающие методы технической диагностики и мониторинга транспортных систем, методы построения надежных и безопасных систем управления, электронного моделирования транспортных процессов и оценки живучести, надежности и безопасности устройств и систем управления.

Следует отметить еще одну важную составляющую журнала: в нем появляются оригинальные результаты исследований, которые впоследствии попадают и на страницы учебных пособий и учебников. К примеру, многие результаты раздела «Техническая диагностика и контролепригодные системы» вошли в учебники по надежности и технической диагностике систем управления [3, 4].

## 2. Краткие статистические сведения о работе журнала

Как отмечалось ранее, журнал «Автоматика на транспорте» включен в базу данных РИНЦ. Публикуются статьи по двум направлениям (согласно государственному рубрикатору научно-технической деятельности (ГРНТИ)): 50.00.00 —

«Автоматика. Вычислительная техника» и 73.00.00 — «Транспорт». В Перечень ВАК новой редакции (от 26.03.2019) журнал входит по специальностям 05.13.06 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)», а также 05.22.08 — «Управление процессами перевозок».

В РИНЦ для журнала рассчитываются показатели по обоим направлениям — 50.00.00 и 73.00.00. Приведем некоторые статистические данные из базы РИНЦ за прошедшие к моменту написания данной статьи (ноябрь 2019) годы.

В качестве показателя был выбран широко известный импакт-фактор, рассчитываемый автоматически самой наукометрической платформой. Импакт-фактор журнала показывает среднее число цитирований в текущем году статей, которые были опубликованы за два прошедших года (см. табл. 3 и 4).

В рейтингах по показателю «Двухлетний импакт-фактор» журнал «Автоматика на транспорте» занимает довольно высокие позиции по обоим направлениям (50.00.00 и 73.00.00). Анализируя данные таблиц, можно сделать вывод о том, что со временем позиции журнала несколько ухудшаются. Так, в рейтинге по импакт-фактору журнал в обоих списках занимал в 2016 году первое место, но в 2018 году опустился на восьмую и третью позиции соответственно (50.00.00 и 73.00.00).

Для изданий транспортного направления в таблицах приведены данные еще по двум известным журналам Петербургского государственного университета

**Таблица 3.** Данные о двухлетнем импакт-факторе РИНЦ (Автоматика. Вычислительная техника)

Позиция в рейтинге	Журнал	Значение показателя
2016		
<b>1</b>	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>1,931</b>
2	Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии	1,299
3	Моделирование систем и процессов	1,087
4	Вопросы кибербезопасности	1,087
2017		
1	International Journal of Open Information Technologies	2,679
<b>2</b>	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>1,394</b>
3	Моделирование систем и процессов	1,378
2018		
1	International Journal of Open Information Technologies	2,607
2	Труды СПИИРАН	1,267
3	Программные системы: теория и приложения	1,207
...	...	...
<b>8</b>	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>0,857</b>

*Примечание.* Всего в РИНЦ 103 журнала по направлению 50.00.00 — «Автоматика. Вычислительная техника».

**Таблица 4.** Данные о двухлетнем импакт-факторе РИНЦ (Транспорт)

Позиция в рейтинге	Журнал	Значение показателя
2016		
1	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>1,931</b>
2	Железные дороги мира	1,364
3	Альтернативные транспортные технологии	1,192
...	...	...
32	Транспорт Российской Федерации	0,409
33	Известия Петербургского университета путей сообщения	0,402
2017		
1	Железные дороги мира	2,462
2	САПР и ГИС автомобильных дорог	1,413
3	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>1,394</b>
...	...	...
20	Известия Петербургского университета путей сообщения	0,45
...	...	...
23	Транспорт Российской Федерации	0,433
2018		
1	Наука и технологии железных дорог	3,429
2	Современные проблемы транспортного комплекса России	0,917
3	<b>Автоматика на транспорте</b>	<b>0,857</b>
...	...	...
12	Транспорт Российской Федерации	0,596
...	...	...
36	Известия Петербургского университета путей сообщения	0,383

*Примечание.* Всего в РИНЦ 73 журнала по направлению 73.00.00 — «Транспорт».

путей сообщения Императора Александра I — «Транспорт Российской Федерации» и «Известия Петербургского университета путей сообщения». Следует отметить, что журнал «Автоматика на транспорте» по данному показателю существенно опережает другие университетские издания, а важность публикаций в нем неоспорима. Об этом свидетельствует значение показателя.

Статистические данные, рассчитанные в РИНЦ, наводят на размышления об основных путях развития «Автоматики на транспорте». Прежде всего это повышение значимости публикуемых статей. Необходимо развивать журнал таким образом, чтобы его публикации касались наиболее существенных результатов, охватывающих широкий круг вопросов в проблематике статьи. Такие статьи будут иметь большую популярность среди читателей и исследователей, опирающихся на достижения авторов журнала. Второй немаловажный аспект развития — это выбор статей по самым актуальным в современной транспортной отрасли направлениям. К ним смело можно отнести исследования систем

со сложными структурами, вычислениями, обработкой информации, моделированием и тестированием, использованием беспроводных каналов передачи данных, «интернета вещей», облачных и туманных вычислений, альтернативных источников энергоснабжения, киберфизических систем и систем тотальной автоматизации технологических процессов, применения методов искусственного интеллекта. И, конечно же, нельзя забывать о методах технической диагностики, обеспечения контролепригодности и надежности структур и безопасности их функционирования, а также о работах в области стандартизации и сертификации в обозначенных направлениях.

### **Заключение**

Журнал «Автоматика на транспорте», прошедший пятилетний рубеж, сегодня является одним из немногих изданий, освещающих научно-технические вопросы в сфере автоматизации на транспорте, в первую очередь железнодорожном. Каждая из статей направлена на информирование научной общественности о ключевых достижениях авторов в предметных областях, обо всем, что необходимо учитывать при разработке, проектировании и развитии современных транспортных управляющих комплексов, систем и устройств.

Надеемся, что в будущем журнал продолжит прекрасные традиции кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», освещая максимально непредвзято, открыто и качественно ключевые вопросы и проблемы в области автоматизации на транспорте.

### **Библиографический список**

1. *Никитин А. Б.* Развитие научной школы кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I // *Автоматика на транспорте*. — 2015. — Т. 1, № 4. — С. 433–451.
2. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* К истории издания научных трудов кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» // *Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматизации и телемеханики: сб. науч. трудов; под ред. Вл. В. Сапожникова*. — СПб.: ПГУПС, 2013. — С. 32–40.
3. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Основы теории надежности и технической диагностики. — СПб.: Издательство «Лань», 2019. — 588 с.
4. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Основы технической диагностики // *Издание второе, переработанное и дополненное; Под ред. В. В. Сапожникова*. — М.: «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. — 423 с.

**V. V. Sapozhnikov**  
**VI. V. Sapozhnikov**

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

**D. V. Efanov**

*«LocoTech-Signal» LLC,  
Department «Automation, Remote Control and Telecommunication on Railway Transport»,  
Russian University of Transport, Moscow*

## THE JOURNAL "AUTOMATION ON TRANSPORT" CELEBRATES ITS 5<sup>th</sup> ANNIVERSARY

«Automation on transport» is one of the few journals in Russia which was based and is currently supervised by one of the chairs of the university. 2019 was the fifth year of its foundation. Academic thinkers dwell on historical aspects of its creation, performance results, major issues covered in it as well as the future trends for development. Some statistical data on publication activity of the journal and its authors, as well as the data obtained from Russian Science Citation Index database is provided in the article.

periodicals, journal, automation on transport, publication activity indices

### References

1. *Nikitin A. B. (2015) Razvitiye nauchnoy shkoly kafedry "Avtomatika i telemekhanika na zheleznykh dorogakh" Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I [The development of a scientific school at the chair of "Railway Automation and Remote Control" of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University]. Avtomatika na transporte [Automation on transport], vol. 1, no. 4, pp. 433–451. (In Russian)*
2. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. & Efanov D. V. (2013) K istorii izdaniya nauchnykh trudov kafedry "Avtomatika i telemekhanika na zheleznykh dorogakh" [Publishing history of the studies conducted at the chair of "Railway Automation and Remote Control"]. Aktualniye voprosy razvitiya system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [The development of railway automation and remote control systems: topical issues]. Collection of scientific papers. Ed. by VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., pp. 32–40. (In Russian)*
3. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Foundations of the theory of reliability and technical diagnostics]. St. Petersburg, Publishing house "Lan" Publ., 588 p. (In Russian)*
4. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Foundations of technical diagnostics]. Ed. by V. V. Sapozhnikov. 2<sup>nd</sup> edition, revised and enlarged. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 423 p. (In Russian)*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным  
Поступила в редакцию 06.12.2019, принята к публикации 23.12.2019*

*САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович* — доктор технических 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* — доктор технических 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* — доктор технических наук, доцент, руководитель направления комплексных систем управления ООО «ЛокоТех-Сигнал», профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта;  
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

© Сапожников Вал. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В., 2020

Подписано в печать с оригинал-макета 23.03.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 14,25 Уч.-изд. л. 7,25.  
Установочный тираж 300 экз. Заказ 000.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО ПГУПС,  
190031, СПб., Московский пр., 9.