



# Автоматика на транспорте

---

## Automation on Transport

№ 1

Том 5

Март, 2019

March, 2019



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Учредитель**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**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

ISSN 2412-9186

Индекс Роспечати 80525

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

**Адрес редакции**

190031, РФ, Санкт-Петербург,  
Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,  
+7(812) 457-8579  
at.pgups@gmail.com

**Редакция журнала**

Перевод на английский язык  
*А. А. Блюдова*  
Литературное редактирование и корректура *И. А. Шабранской*  
Верстка *М. С. Савастеевой*

Электронное сопровождение  
*Д. В. Пивоварова*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019

**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

**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

ISSN 2412-9186

Rospachat Index 80525

The Journal is included in the Bulletin  
of leading peer-reviewed scientific journals  
and publications

**Address**

190031, Russia, St. Petersburg,  
Moskovskiy pr., 9, «Automation and remote  
control on Railways» department,  
+7(812) 457-8579  
at.pgups@gmail.com

**Journal staff**

English translation  
*Anton A. Blyudov*  
Editing and proofreading  
*Irina A. Shabranskaya*  
Layout *Marya S. Savasteeva*

Electronic maintenancy  
*Dmitry V. Pivovarov*

© PSTU, 2019

## Международный редакционный совет

*Валерий Сапожников*  
доктор техн. наук, профессор, ПГУПС,  
главный редактор журнала  
«Автоматика на транспорте»,  
Санкт-Петербург, Россия

*Константин Бочков*  
доктор техн. наук, профессор,  
Белорусский государственный  
университет транспорта,  
Гомель, Белоруссия

*Сергей Власенко*  
кандидат техн. наук, доцент,  
Сименс, Брауншвейг, Германия

*Александр Дундуа*  
доктор наук, профессор,  
Грузинский технический университет,  
Тбилиси, Грузия

*Марек Мезитис*  
доктор наук, доцент,  
Рижский технический университет,  
Рига, Латвия

*Йохен Тринкауф*  
доктор наук, профессор,  
Технический университет Дрездена,  
Дрезден, Германия

*Раймунд Убар*  
доктор техн. наук, академик  
Эстонской академии наук,  
Таллинский технический университет,  
Таллин, Эстония

*Владимир Хаханов*  
доктор технических наук, профессор,  
Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники,  
Харьков, Украина

*Фуниан Ху*  
доктор наук, профессор,  
Школа электротехники педагогического  
университета Цзянсу,  
Сюйчжоу, Китай

*Христо Христов*  
доктор техн. наук, профессор,  
Технический университет,  
София, Болгария

## Редакционная коллегия

*Никитин Александр Борисович*  
доктор техн. наук, профессор, заместитель  
главного редактора журнала «Автоматика  
на транспорте»,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Соколов Вадим Борисович*  
кандидат техн. наук, доцент, научный редактор  
журнала «Автоматика на транспорте»,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Баранов Леонид Аврамович*  
доктор техн. наук, профессор,  
РУТ, Москва

*Бестемьянов Петр Филимонович*  
доктор техн. наук, профессор,  
РУТ, Москва

*Бушуев Сергей Валентинович*  
кандидат техн. наук, доцент,  
УрГУПС, Екатеринбург

*Василенко Михаил Николаевич*  
доктор техн. наук, профессор,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Долгий Игорь Давидович*  
доктор техн. наук, профессор,  
РГУПС, Ростов-на-Дону

*Ефанов Дмитрий Викторович*  
доктор техн. наук, доцент,  
ООО «ЛокоТех-Сигнал», Москва

*Кокурин Иосиф Михайлович*  
доктор техн. наук, профессор,  
ИПТ РАН, Санкт-Петербург

*Марков Дмитрий Спиридонович*  
кандидат техн. наук, доцент,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Наседкин Олег Андреевич*  
кандидат техн. наук, доцент,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Никищенков Сергей Алексеевич*  
доктор техн. наук, профессор,  
СамГУПС, Самара

*Пыркин Антон Александрович*  
доктор техн. наук, профессор,  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

*Розенберг Ефим Наумович*  
доктор техн. наук, профессор,  
НИИАС, Москва

*Сапожников Владимир Владимирович*  
доктор техн. наук, профессор,  
ПГУПС, Санкт-Петербург

*Шаманов Виктор Иннокентьевич*  
доктор техн. наук, профессор,  
РУТ, Москва

*Ходаковский Валентин Аветикович*  
доктор 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 editor  
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. Bestemiyanov*

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,  
«LocoTech-Signal» LLC, 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 Vl. 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

*Володарский В. А.*

Нахождение функций распределения при неполноте исходной информации  
об отказах устройств железнодорожной автоматики и телемеханики ..... 7

### Управление в технических системах

*Сперанский Д. В.*

Функциональный контроль линейных динамических систем методом обращения ..... 18

### Системы автоматики и управления

*Засов В. А.*

Компенсация помех в приемниках сигналов автоматической локомотивной  
сигнализации ..... 32

*Никитин А. Б., Кушпиль И. В.*

Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных  
между станциями на малодеятельных линиях ..... 45

*Гордон М. А.*

Особенности работы систем управления движением поездов на станциях  
стыкования в Российской Федерации ..... 62

### Мониторинг инфраструктуры транспортных систем

*Голюк В. П., Назаров Д. Г.*

Комплексный подход к геодезическому контролю укладки асфальтобетонного  
покрытия на примере строительства автодорожного мостового перехода  
через Керченский пролив ..... 78

### Автоматизация проектирования

*Василенко М. Н., Бубнов В. П., Булавский П. Е., Василенко П. А.*

Ошибки в технической документации железнодорожной автоматики  
и телемеханики и их влияние на безопасность движения поездов ..... 94

### Техническая диагностика и контролепригодные системы

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

Модифицированные модульные коды с суммированием взвешенных разрядов  
с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный  
ряд чисел ..... 113

---

## Contents

### Vitality, reliability, safety

*Volodarskiy V. A.*

Determination of the distribution functions parameters in the incompleteness of the initial information about failures of railway automation and remote control devices..... 7

### Control in technical systems

*Speranskiy D. V.*

Functional control of linear dynamic by system reversion method ..... 18

### Automation and control systems

*Zasov V. A.*

Compensation of noise in signal receivers automatic locomotive signaling ..... 32

*Nikitin A. B., Kushpil I. V.*

Investigation of the possibility of introduction of digital radio communications and organization of data transfer between stations at low-density lines ..... 45

*Gordon M. A.*

Features of operation of train control systems at joining traction stations in the Russian Federation ..... 62

### Transport Infrastructure Monitoring

*Goliuk V. P., Nazarov D. G.*

Integrated approach to the geodesic control of the installation of asphalt-concrete coating on the example of the construction of the road bridge transition through the Kerch sheet ..... 78

### Design Automation

*Vasilenko M. N., Bubnov V. P., Bulavsky P. E., Vasilenko P. A.*

Errors in the technical documentation of railway automation and remote control and their impact on the safety of train traffic ..... 94

### Technical diagnostics and controllable systems

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

Modified modulo codes with weight-based bits summation with natural number sequence of weight indexes ..... 113

УДК 621.3.019

**В. А. Володарский, канд. техн. наук**Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»,  
Красноярский институт железнодорожного транспорта

## **НАХОЖДЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ НЕПОЛНОТЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОТКАЗАХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Представлен один из возможных методических подходов к нахождению параметров функций распределения показателей надежности при постепенных отказах элементов железнодорожной автоматики и телемеханики для случаев, когда известны оценки коэффициента вариации или наработки на отказ. В первом случае рекомендовано использовать нормальное распределение, распределение Вейбулла и гамма-распределение, параметры которых могут быть определены с использованием изложенного в статье метода. Во втором случае рекомендовано использовать распределение, аппроксимированное функцией косинуса.

Представляется целесообразным провести исследования нормального, Вейбулла, гамма- и аппроксимированного функцией косинуса распределений на эквивалентность решений, получаемых при использовании математических моделей оптимизации технического содержания и расчета надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

показатель надежности; функция распределения; параметр; коэффициент вариации; наработки на отказ

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-7-17.

### **Введение**

При разработке математических моделей оптимизации технического содержания и расчета надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) должны быть заданы вид и значения параметров функций распределения показателей надежности их элементов [1–4]. Общих методов описания физических процессов в развитии отказов пока не существует. Имеются только некоторые сравнительно простые математические модели, основанные на предельных свойствах случайных величин и потоков событий или упрощенных физических предпосылках [5]. Так, внезапные отказы обычно описывают экспоненциальным распределением, для описания постепенных отказов часто используют нормальное, Вейбулла и гамма-распределение [5–7]. Для этих распределений достаточно хорошо

разработан математический аппарат и имеются необходимые для расчетов статические таблицы [8].

Нахождение вида и параметров распределений зачастую связано с трудностями, вызванными малым объемом (неполнотой) статических данных об отказах. Под неполнотой исходной информации здесь понимается такая выборка об отказах, количество членов которой меньше необходимого по правилам прикладной статистики числа наблюдений для проверки согласия опытного распределения с теоретическим распределением [9].

Цель статьи – изложение одного из возможных методических подходов к определению параметров функций распределения показателей надежности ЖАТ для случаев, когда, например, на основе статистических данных о постепенных отказах могут быть оценены значения коэффициента вариации  $V$  или наработки на отказ  $T$ . Эти характеристики определяются по известным уравнениям

$$V = \delta / T; T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \delta = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - T)^2 \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение;  $n$  – число отказов;  $t_i$  –  $i$ -я реализация наработки между отказами.

## 1. Нахождение параметров функций распределений при оцененном значении коэффициента вариации

При оцененном по (1) значении коэффициента вариации для описания постепенных отказов целесообразно использовать нормальное, Вейбулла и гамма-распределение. Для дальнейших исследований приведем эти распределения к безмерному виду следующим образом.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  при нормальном распределении находятся по уравнениям [8]:

$$P(t) = F_0\left(\frac{T-t}{\delta}\right); \lambda(t) = \frac{1}{\delta} f_1\left(\frac{T-t}{\delta}\right), \quad (2)$$

где  $F_0, f_1$  – табулированные функции [8];  $t$  – время эксплуатации.

Подставив полученное из (1) выражение  $\delta = VT$  в (2) и умножив  $\lambda(t)$  на  $T$ , получим

$$P(u) = F_0\left(\frac{1-u}{V}\right); \lambda(u) = \frac{1}{V} f_1\left(\frac{1-u}{V}\right), \quad (3)$$

где  $u$  – время в единицах наработки на отказ;  $u = t/T$ .

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов при распределении Вейбулла находятся по уравнениям [8]:

$$P(t) = \exp\left[-(t/a)^b\right]; \lambda(t) = b/a(t/a)^{b-1}, \quad (4)$$

где  $a$  – параметр масштаба;  $b$  – параметр формы;

$$a = T/k_b; k_b = \Gamma(1+1/b), \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – табулированная гамма-функция [8].

Подставив значение  $a$  из (5) в выражение (4) и умножив  $\lambda(t)$  на  $T$ , получим

$$P(u) = \exp\left[-(uk_b)^b\right]; \lambda(u) = bk_b(uk_b)^{b-1}. \quad (6)$$

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов при гамма-распределении находятся по уравнениям:

$$P(t) = \exp(-rt) \sum_0^{m-1} \frac{(rt)^i}{i!}; \lambda(t) = \frac{m(ru)^{m-1}}{(m-1)! \sum_0^{m-1} (rt)^i / i!}, \quad (7)$$

где  $r$  – параметр масштаба;  $m$  – параметр формы; наработка на отказ при этом равна  $T = m/r$ , откуда  $r = m/T$ .

Подставив полученное значение для  $r$  в (7) и умножив  $\lambda(t)$  на  $T$ , получим

$$P(t) = \exp(-mu) \sum_0^{m-1} (mu)^i / i!; \lambda(t) = \frac{m(mu)^{m-1}}{(m-1)! \sum_0^{m-1} (mu)^i / i!}. \quad (8)$$

Данные выражения являются функцией одного из параметров: коэффициента вариации  $V$  при нормальном распределении (3), параметра формы  $b$  при распределении Вейбулла (6) и параметра формы  $m$  при гамма-распределении (8).

Если по статистическим данным об отказах удастся оценить с помощью (1) коэффициент вариации  $V$ , то принципы определения параметров рассмотренных функций распределения заключается в следующем.

1. Нормальное распределение однозначно определяется значением  $V$ .
2. В случае распределения Вейбулла при оцененном значении  $V$  параметр формы  $b$  может быть найден:

– по таблице [8, с. 58];

– с достаточной для практики точностью из выражения  $b = 1/V$ .

Тогда параметр масштаба определяется как  $a = T / k_b$ . Значение  $k_b$  находится по (5) или по таблице [8, с. 58].

3. В случае гамма-распределения при оцененном значении  $V$  параметр формы находится из выражения  $m = 1/V^2$ , причем принимается ближайшее целое значение  $m$ . Тогда параметр масштаба определяется как  $r = m/T$ .

В табл. 1–3 представлены значения вероятности безотказной работы в зависимости от времени эксплуатации в единицах наработки на отказ  $u$  для нормального, Вейбулла и гамма-распределения, вычисленные по формулам (3), (6) и (8) при разных коэффициентах вариации  $V$ .

**Таблица 1.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,5$

$u$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
Нормальное распределение	1,0	0,945	0,885	0,778	0,655	0,500	0,345	0,222	0,115
Распределение Вейбулла, $b = 2,1$	1,0	0,973	0,893	0,767	0,616	0,460	0,320	0,208	0,131
Гамма-распределение, $m = 4$	1,0	0,991	0,921	0,770	0,603	0,433	0,294	0,200	0,120

**Таблица 2.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,375$

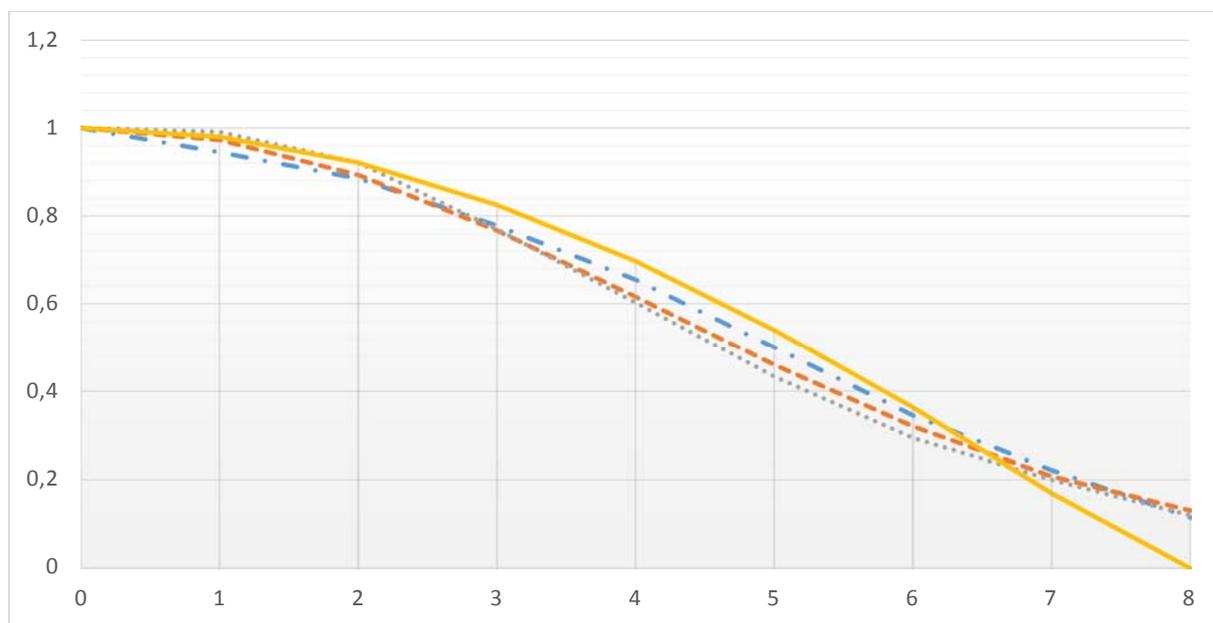
$u$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
Нормальное распределение	1,0	0,983	0,956	0,856	0,703	0,500	0,297	0,144	0,044
Распределение Вейбулла, $b = 2,9$	1,0	0,993	0,951	0,849	0,686	0,487	0,295	0,148	0,044
Гамма-распределение, $m = 7$	1,0	0,999	0,976	0,857	0,680	0,450	0,270	0,140	0,06

**Таблица 3.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,29$

$u$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
Нормальное распределение	1,0	0,997	0,977	0,915	0,754	0,500	0,246	0,085	0,023
Распределение Вейбулла, $b = 3,9$	1,0	0,999	0,983	0,911	0,752	0,506	0,250	0,08	0,014

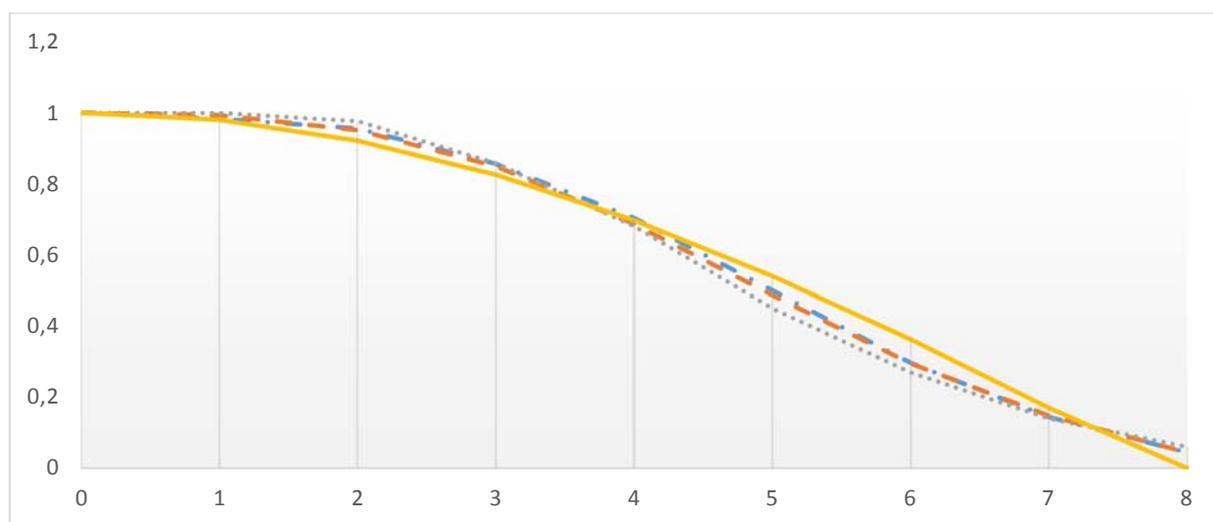
На рис. 1–3 представлены графики зависимости вероятности безотказной работы от времени эксплуатации рассмотренных функций распределения при разных коэффициентах вариации. Из рисунков видно, что с уменьшением коэффициента вариации расхождение между кривыми становится меньше. Известно, что при  $m = 12$ , что соответствует  $V = 0,29$ ,

гамма-распределение приближается к нормальному распределению [5]. Как видно из рис. 3, при коэффициенте вариации  $V = 0,29$ , что соответствует  $b = 3,9$ , расхождение между распределениями нормальным и Вейбулла становится незначительным.



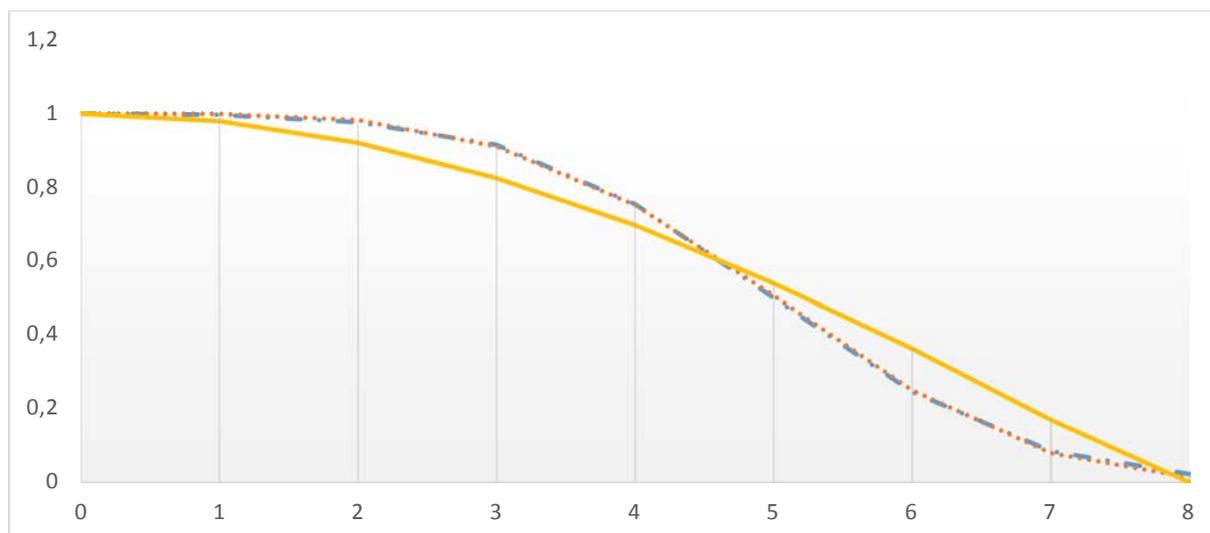
**Рис. 1.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,5$

— · — Нормальное распределение,  $V=0,5$  — · — Распределение Вейбулла,  $b=2,1$   
· · · · · Гамма-распределение,  $m=4$  — — — — — Распределение косинуса



**Рис. 2.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,375$

— · — Нормальное распределение,  $V=0,375$  — · — Распределение Вейбулла,  $b=2,9$   
· · · · · Гамма-распределение,  $m=7$  — — — — — Распределение косинуса



**Рис. 3.** Вероятность безотказной работы при  $V = 0,29$

— • — Нормальное распределение,  $V=0,29$     ••••• Распределение Вейбулла,  $b=3,9$   
 — — — — — Распределение косинуса

## 2 Аппроксимация функции распределения при оцененном значении наработки на отказ

При малом объеме статистического материала об отказах, когда удастся оценить только значение наработки на отказ  $T$ , целесообразно использовать приближенное описание распределений показателей надежности простыми аналитическими функциями. Известно несколько способов аппроксимации показателей надежности линейными функциями, например, интенсивности отказов  $\lambda(t) = a + bt$  [10, 11], вероятности безотказной работы  $P(t) = 1 - at$  [12] и  $P(t) = a + bt$  [13], параметра потоков отказов  $\omega(t) = a + bt$  [14]. Перечисленные аппроксимирующие функции имеют ряд недостатков. Ими можно аппроксимировать распределения показателей надежности на отдельных и, как правило, начальных отрезках времени. Трудности возникают с определением коэффициентов  $a$  и  $b$ , а также с аналитическим определением других показателей надежности, кроме аппроксимированных.

С другой стороны, нахождение определения функций распределения показателей надежности элементов ЖАТ требует больших затрат времени и средств, а иногда просто невозможно [7]. Поэтому показатели надежности определяются путем сбора и обработки информации об отказах в условиях эксплуатации. Получены численные значения параметра потока отказов элементов ЖАТ как постоянные величины [7]. Из теории надежности известно, что параметр потока отказов при любом виде распределения стремится к стационарному значению  $\omega = 1/T$ , где  $T$  – наработка на отказ.

Это проявляется при сборе статистических данных об отказах элементов ЖАТ в реальных условиях эксплуатации.

Поскольку параметр потока отказов, согласно [15], для рассмотренных распределений (нормального, Вейбулла и гамма-) при  $t = T$  приближается к своему стационарному значению, равному  $1/T$ , предлагается аппроксимировать зависимость этого параметра от времени эксплуатации функцией вида [16]:

$$\omega(u) = u \text{ при } u < 1; \quad \omega(u) = 1 \text{ при } u > 1, \quad (9)$$

где  $u = t/T$ , измеряется в радианах.

Остальные показатели надежности находятся с использованием преобразования Лапласа. Плотность распределения  $f(u)$  найдем из уравнения, связывающего ее в операторной форме с параметром потока отказов:

$$f(s) = \omega(s)[1 + \omega(s)]^{-1}, \text{ как } f(u) = \sin u. \quad (10)$$

Тогда вероятность безотказной работы и интенсивность отказов

$$P(u) = 1 - \int_0^u f(u) du = \cos u; \quad \lambda(u) = f(u) / P(u) = \operatorname{tg} u. \quad (11)$$

Как видно из уравнений (10) и (11), распределения показателей надежности выражены через элементарные функции, что очень удобно при разработке моделей управления надежностью ЖАТ и производстве необходимых вычислений.

Назовем полученное аппроксимированное распределение распределением косинуса. В связи с тем что интенсивность отказов такого распределения является, согласно (11), возрастающей функцией времени, оно применимо для описания процессов старения и износа элементов ЖАТ. Кроме того, функция косинуса является:

1. Распределением с возрастающей средней интенсивностью отказов [6], поскольку выражение

$$\frac{1}{u} \int_0^u \lambda(u) du = \frac{-\ln \cos u}{u}$$

является возрастающим при  $u > 0$ .

2. Распределением типа «новое лучше использованного» [6], поскольку

$$P(u + \alpha) = \cos(u + \alpha) < P(u) P(\alpha) = \cos u \cos \alpha \text{ при } u > 0 \text{ и } \alpha > 0.$$

Это означает, что условная вероятность безотказной работы элемента с наработкой  $\alpha$  меньше, чем соответствующая вероятность безотказной работы для совершенно нового элемента.

3. Распределением типа «новое в среднем лучше использованного» [6], поскольку

$$\int_0^{\infty} P(u + \alpha) du = 1 - \sin \alpha < P(\alpha) = \cos \alpha \text{ при } \alpha < 0.$$

Это означает, что остаточное время жизни элемента с наработкой  $\alpha$  меньше, чем у нового элемента [6].

Коэффициент вариации распределения косинуса найдем из уравнения

$$V = \left[ \int_0^{n/2} (U - 1)^2 \sin u du \right]^{0,5} = (n - 3)^{0,5} = 0,375.$$

В табл. 4 представлены значения вероятности безотказной работы в зависимости от времени эксплуатации в единицах наработки на отказ  $u$ , вычисленных по формуле (11).

**Таблица 4.** Вероятность безотказной работы при распределении косинуса

$u$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	$n/2$
Распределение косинуса	1,0	0,980	0,921	0,825	0,697	0,540	0,363	0,170	0

На рис. 1–3 пунктирной линией представлены графики вероятности безотказной работы, описываемые распределением косинуса. Из рисунков видно относительно хорошее совпадение рассмотренных теоретических распределений (нормальное, Вейбулла и гамма-) при  $V \geq 0,375$  с функцией косинуса на интервале времени  $0 \leq u \leq 1,4$ .

## Заключение

1. В условиях неполноты исходной информации, при оцененном значении коэффициента вариации, для описания показателей надежности и постепенных отказах элементов ЖАТ целесообразно использовать нормальное, Вейбулла и гамма-распределения, параметры которых могут быть определены с использованием изложенного в статье метода.

2. Для случая, когда известна только оценка наработки на отказ, рекомендуется использовать распределение косинуса, которое достаточно хорошо описывает процессы старения и износа элементов ЖАТ.

3. Предложенный методический подход определения параметров функций распределения в условиях неполноты исходной информации может быть

использован при разработке точных и упрощенных моделей управления надежностью ЖАТ. Представляется целесообразным провести исследования нормального, Вейбулла, гамма- и аппроксимированного функцией косинуса распределений на эквивалентность решений, получаемых при использовании математических моделей оптимизации технического содержания и расчета надежности систем ЖАТ.

## Библиографический список

1. Шаманов В. И. Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 481–492.
2. Володарский В. А. Стратегии, критерии и расчет периодичности замен аппаратуры автоматики и телемеханики / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 165–177.
3. Горелик А. В. Анализ показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом экономических критериев / А. В. Горелик, П. А. Неваров // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 271–281.
4. Богданов А. Г. Принципы сбора данных об отказах элементов систем управления транспортными средствами / А. Г. Богданов, Д. А. Скороходов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 491–505.
5. Герцбах И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. – М. : Советское радио, 1966. – 166 с.
6. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Наука, 1984. – 328 с.
7. Сапожников В. В. Надежность железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.
8. Шор Я. Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. – М. : Советское радио, 1968. – 288 с.
9. ГОСТ 11.006–74. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – [М., 1974].
10. Ibok E. U. Optimal maintenance scheduling of molded case circuit breaker in underground coal mines / E. U. Ibok, M. Chinnarao // Mining industry technical conference. – Pittsburgh, 1979. – Pp. 57–68.
11. Баранов Л. А. Оценка показателей надежности «линейно-старееющего» объекта / Л. А. Баранов, Ю. А. Ермолин // Надежность. – 2015. – № 4. – С. 57–60.
12. Копелевич Б. М. Методы расчета характеристик профилактического обслуживания технических систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Рига : АН Латв. ССР, 1972. – 32 с.
13. Леонтьев Л. П. Некоторые проблемы и пути решения задач оптимизации профилактического обслуживания технических систем // Автоматика и вычислительная техника. – 1973. – № 3. – С. 29–33.
14. Малевский Г. В. Планирование профилактики в условиях частичной неопределенности / Г. В. Малевский, Э. К. Ринкус // Надежность и контроль качества. – 1974. – № 8. – С. 50–55.
15. Рябинин И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И. А. Рябинин. – Л. : Судостроение, 1971. – 456 с.
16. Володарский В. А. О тригонометрических распределениях для описания отказов технических устройств / В. А. Володарский // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 16–19.

*Vladislav A. Volodarskiy,*  
Department «Systems of train traffic provision»,  
Krasnoyarsk state transport institute

### **Determination of the distribution functions parameters in the incompleteness of the initial information about failures of railway automation and remote control devices**

The paper presents one of the possible methodological approaches to determining the parameters of the distribution functions of reliability indicators with gradual failures of elements of railway automation and remote control for cases when estimates of the coefficient of variation or time between failures are known. In the first case, it is recommended to use the normal distribution, the Weibull distribution and the gamma distribution, the parameters of which can be determined using the method described in the article. In the second case, it is recommended to use the distribution approximated by the cosine function.

It seems appropriate to conduct studies of the normal, Weibull, gamma and approximated by the cosine function distributions for the equivalence of the solutions obtained using mathematical models for optimizing the technical content and calculating the reliability of railway automation and remote control systems.

reliability indicator; distribution function; parameter; coefficient of variation

### **References**

1. Shamanov V. I. (2016). Methods of optimization of technical maintenance of automation systems [Metody' optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia sistem avtomatiki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, N 4. – Pp. 481–492.
2. Volodarskiy V. A. (2017). Strategies, criteria and calculation of replacement periodicity of automation and remote control equipment [Strategii, kriterii i raschet periodichnosti zamen apparatury' avtomatiki i telemehaniki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, N 2. – Pp. 165–177.
3. Gorelik A. V., Nevarov P. A. (2015). Analysis of reliability performances of railway automation and remote control systems, considering economical criteria [Analiz pokazatelei' nadezhnosti funkcionirovaniia sistem zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki s uchetom e'konomicheskikh kriteriev]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 1, N 3. – Pp. 271–281.
4. Bogdanov A. G., Skorohodov D. A. (2017). Principles of data gathering about refusals of the equipment of vehicles at their operation [Printsipy' sbora danny'kh ob otkazakh e'lementov sistem upravleniia transportny'mi sredstvami]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, N 4. – Pp. 491–505.
5. Gertcbakh I. B., Kordonskiy Kh. B. (1966). Failure models [Modeli otkazov]. Moscow, Soviet radio Publ. – 166 p.
6. Barlow R., Proschan F. (1984). Statistical Theory of Reliability and Reliability Tests [Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost]. Moscow, Nauka Publ. – 328 p.
7. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl., V., Shamanov V. I. (2003). Reliability of railway automation, remote control and communication [Nadezhnost zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemehaniki i svyazy]. Moscow, Marshrut Publ. – 263 p.

8. Shor Ia. B, Kuzmin F. I. (1968). Reliability Analysis and Monitoring Tables [Tablitsy dlia analiza i kontrolya nadezhnosti]. Moscow : Soviet radio Publ. – 288 p.
9. GOST 11.006–74. Application statistics. Rules for verifying compliance with an experimental distribution with theoretical.
10. Ibok E. U., Chinnarao M. (1979). Optimal maintenance scheduling of molded case circuit breaker in underground coal mines [Ocenka pokazatelei' nadezhnosti linei'no-stareiushego ob'ekta]. Mining industry technical conference. Pittsburgh. – Pp. 57–68.
11. Baranov L. A., Ermolin Iu. A. (2015). Evaluation of reliability indicators of a «linearly aging» facility [Ocenka pokazatelei' nadezhnosti «linei'no-stareiushego» ob'ekta]. Reliability [Nadezhnost], N 4. – Pp. 57–60.
12. Kopelevich B. M. (1972). Methods for calculating the characteristics of preventive maintenance of technical systems. Abstract of PhD thesis. Riga, Academy of Sciences of Lat. SSR. – 32 p.
13. Leontyev L. P. (1973). Some problems and ways to solve optimization problems of preventive maintenance of technical systems [Nekotory'e problemy' i puti resheniia zadach optimizatsii profilakticheskogo obsluzhivaniia tekhnicheskikh system]. Automation and Computer Engineering [Avtomatika i vy'chislitel'naia tekhnika], N 3. – Pp. 29–33.
14. Malevskiy G. V., Rinkus E. K. (1974). Partial uncertainty prevention planning [Planirovaniye profilaktiki v usloviakh chastichnoi' neopredelennosti]. Reliability and quality control [Nadezhnost' i kontrol' kachestva], N 8. – Pp. 50–55.
15. Riabinin I. A. (1971). Fundamentals of the theory and calculation of the reliability of the ship electric power systems [Osnovy' teorii i rascheta nadezhnosti sudovy'kh e'lektroe'nergeticheskikh system]. Leningrad, Sudostroenie Publ. – 456 p.
16. Volodarsky V. A. (2016). About trigonometric distributions to describe technical device failures [O trigonometriceskikh raspredeleniiakh dlia opisaniia otkazov tekhnicheskikh ustroi'stv]. Reliability [Nadezhnost], N 2. – Pp. 16–19.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 20.06.2018, принята к публикации 11.09.2018*

*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., 2019

УДК 681.518

**Д. В. Сперанский, д-р техн. наук**Кафедра «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь»,  
Российский университет транспорта

## **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ОБРАЩЕНИЯ**

Предлагается метод синтеза обращенной системы для заданной дискретной линейной динамической системы. Обращенная система предназначена для восстановления (инвертирования) неизвестного входного сигнала дискретной системы по ее наблюдаемому выходу. Такое инвертирование сейчас особенно востребовано, если оно может быть выполнено в том же темпе, что и функционирование исходной системы.

В статье рассматривается задача синтеза обращенной системы для двух видов линейных систем, называемых системами без потери информации. Показано, что для них решение такой задачи сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений. Математический аппарат для их решения давно и хорошо разработан. Для систем большой размерности эффективным в практических приложениях является, в частности, метод Гаусса, применение которого и проиллюстрировано в статье для синтеза обращенной системы.

Построенная обращенная система может быть использована в качестве главной компоненты встроенных схем, применяемых для функционального контроля линейных динамических систем.

техническая диагностика; система функционального контроля; линейные системы; системы без потери информации; метод Гаусса решения систем линейных алгебраических уравнений

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-18-31.

### **Введение**

Обратные задачи естествознания относятся к числу активно исследуемых, в том числе в рамках теории систем и теории управления. Эти задачи рассматривались в различных постановках начиная с середины прошлого века. Им посвящено большое количество публикаций. Обзор литературы лежит за рамками нашей статьи, поскольку такие обзоры уже имеются, например в [1]. Тем не менее укажем некоторые известные публикации. Так, в ставших классическими монографиях [2, 3] часть материала посвящена упомянутой проблематике.

В теории автоматического управления большой интерес проявляется к задачам робастного обращения систем. Цель такого обращения – восстановление неизвестного входного сигнала дискретной системы по ее измеряемому

выходному сигналу. Этим задачам посвящена, к примеру, монография [4]. Среди недавних публикаций по рассматриваемой тематике назовем [5].

Заметим, что значительные трудности возникают, если решение задачи обращения должно быть выполнено в том же темпе, что и функционирование исходной системы. Это означает, что результат обращения должен синхронизироваться с текущими измерениями выходов исходной системы. Другими словами, результат на выходе обращенной (инвертированной) системы должен появляться по возможности с минимальной задержкой. Величина этой задержки зависит от времени инвертирования. Такие методы инвертирования сегодня наиболее востребованы.

Востребованность объясняется тем, что упомянутая особенность системы обращения позволяет эффективно решать задачи измерения мгновенных значений физических переменных. К их числу относятся задачи идентификации систем, планирования траекторий движения в робототехнике, контроля и диагностики цифровых систем различного назначения.

Известно, что такие измерения актуальны для идентификации систем, при планировании траекторий в робототехнике, при синтезе высокоточных систем наведения и т. д. Такие измерения используются также и при криптографическом преобразовании информации [6].

К области приложений методов обращения систем относится и обеспечение высокой надежности работы систем управления различного назначения. Один из эффективных способов такого обеспечения связан с использованием схем встроенного контроля (СВК). Основаны они на сравнении входных сигналов контролируемых систем с сигналами, восстанавливаемыми по их выходам с использованием обращенных систем. Рассогласование этих сигналов свидетельствует о неправильном функционировании исходной системы. Этот факт дает возможность зафиксировать ошибку в ранний момент ее появления, тем самым препятствуя ее распространению.

Использование СВК позволяет осуществлять функциональный контроль работы системы [7]. Такой контроль ведется непрерывно, параллельно с работой проверяемой системы, выполняющей свои прямые функции.

В отличие от тестового контроля, требующего прерывания работы проверяемой системы, функциональный контроль необходим в тех случаях, когда прерывание невозможно по условиям эксплуатации.

Настоящая статья посвящена задаче синтеза обращенной системы для дискретных линейных стационарных динамических систем, которая может быть использована в качестве «ядра» СВК.

## 1. Математическая модель дискретной линейной динамической системы

Далее в качестве названной модели будет использована линейная последовательностная машина (для краткости будем именовать ее линейным автоматом (ЛА)), ее детальное описание дается, например, в [8]. Напомним, что ЛА задается над конечным полем  $GF(p) = \{0, 1, \dots, p-1\}$ , где  $p$  – простое число. Введем следующие обозначения:

$$\bar{u}(t) = (u_1, \dots, u_l)', \quad \bar{y}(t) = [y_1, \dots, y_m]', \quad \bar{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_n(t)]',$$

где  $\bar{u}(t), \bar{y}(t), \bar{s}(t)$  – соответственно входной, выходной векторы и вектор состояния; под состоянием ЛА понимается упорядоченная совокупность состояний элементов задержек, входящих в состав ЛА; число  $n$  называют размерностью ЛА.

Функционирование ЛА  $\tilde{A}$  задается уравнениями переходов и выходов

$$\bar{s}(t+1) = A\bar{s}(t) + B\bar{u}(t); \quad (1)$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{s}(t) + D\bar{u}(t), \quad (2)$$

где  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ ,  $B = [b_{ij}]_{n \times l}$ ,  $C = [c_{ij}]_{m \times n}$ ,  $D = [d_{ij}]_{m \times l}$  – характеристические матрицы, элементы которых принадлежат  $GF(p)$ .

В [8] приведены следующие формулы для вычисления конечного состояния и выходной реакции ЛА на входную последовательность  $\bar{u}(0), \bar{u}(1), \dots, \bar{u}(k)$ :

$$\bar{s}(k+1) = A^{k+1}\bar{s}(0) + A^k B\bar{u}(0) + A^{k-1} B\bar{u}(1) + \dots + AB\bar{u}(k-1) + B\bar{u}(k); \quad (3)$$

$$\bar{y}(k) = CA^k\bar{s}(0) + CA^{k-1} B\bar{u}(0) + CA^{k-2} B\bar{u}(1) + \dots + CB\bar{u}(k-1) + D\bar{u}(k). \quad (4)$$

Если обозначить через  $S, U, Y$  множества состояний, входов и выходов ЛА, то формулы (1) и (2) реализуют соответственно отображения  $S \times U \rightarrow S$  и  $S \times U \rightarrow Y$ . Каждому ЛА  $\tilde{A}$  можно поставить в соответствие естественное отображение вход – выход, преобразующее последовательность входных сигналов  $F(U)$  из множества  $U$  в последовательность выходных сигналов  $F(Y)$  при известном начальном состоянии  $\bar{s}(0)$  ЛА  $\tilde{A}$ . Обозначим это отображение следующим образом:

$$G_{\tilde{A}} : F(U) \rightarrow F(Y). \quad (5)$$

Ниже будут рассмотрены две разновидности задачи обращения ЛА. В общем обе эти задачи можно неформально сформулировать таким обра-

зом: для заданного ЛА  $\tilde{A}$ , функционирование которого описывается уравнениями (1) и (2), построить обращенную линейную систему (обозначим ее через  $\tilde{A}^{-1}$ ), для которой должно выполняться равенство

$$G_{\tilde{A}^{-1}}(G_{\tilde{A}}) = F(U), \quad (6)$$

содержательно представляющее собой последовательно выполняемые отображения

$$F(U) \xrightarrow{G_{\tilde{A}}} F(Y) \xrightarrow{G_{\tilde{A}^{-1}}} F(U).$$

## 2. Синтез обращенной системы для линейной динамической системы без потери информации

В работе А. Хаффмена [9] было введено понятие автомата без потери информации (БПИ). Он позволяет восстановить входную последовательность по наблюдаемому выходу и известному начальному состоянию с использованием предварительно проведенного с ним дополнительного эксперимента.

А. Гилл в [8] сформулировал аналог этого понятия для линейного автомата, который при восстановлении не предполагает применение какого-либо дополнительного эксперимента. В [8] приведено легко проверяемое необходимое и достаточное условие, чтобы ЛА был автоматом БПИ. Оно заключается в следующем: ранг матрицы  $D$  в уравнении (2) должен равняться числу  $l$  входов ЛА ( $rank(D) = l$ ).

Обратимся теперь к методу синтеза обращенной системы для ЛА БПИ. Пусть в момент времени  $t$  известен вектор выхода  $\bar{y}(t)$  и состояние  $\bar{s}(t)$  ЛА. Из (2) следует, что

$$D\bar{u}(0) = \bar{y}(0) - C\bar{s}(0), \quad (7)$$

где  $\bar{s}(0)$  – известное начальное состояние ЛА;  $\bar{u}(0)$  – его вход в момент времени  $t = 0$ .

Последнее соотношение будем рассматривать как систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно координат неизвестного входного вектора  $\bar{u}(0)$ .

Поскольку  $rank(D) = l$ , где  $l \neq 0$ , то, согласно алгебре, система (7) имеет единственное решение  $\bar{u}(0)$ . Зная его, по формуле (1) вычисляется  $\bar{s}(1) = A\bar{s}(0) + B\bar{u}(0)$ , а затем и вектор  $\bar{u}(1)$  из равенства  $\bar{y}(1) - C\bar{s}(1) = D\bar{u}(1)$ . По индукции легко вычислить и остальные неизвестные входные сигналы ЛА. Понятно, что если  $l = 1$ , т. е. ЛА имеет только

один вход, то он является автоматом БПИ, когда матрица  $D$  отлична от нулевой.

Проиллюстрируем сказанное на примере ЛА, заданного над полем  $GF(2) = \{0,1\}$ , следующими характеристическими матрицами ( $n = 4, m = 4, l = 2$ ):

$$A = \begin{bmatrix} 1110 \\ 0100 \\ 1001 \\ 0110 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \\ 00 \\ 01 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1011 \\ 1110 \\ 0001 \\ 0100 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 01 \\ 10 \\ 11 \\ 00 \end{bmatrix}.$$

Поскольку  $rank(D) = 2$ , то рассматриваемый ЛА является автоматом БПИ. Введем обозначения для входных, выходных векторов и векторов состояний:

$$\bar{u}(t) = (u_1, u_2)', \quad \bar{y}(t) = (y_1, y_2, y_3, y_4)', \quad \bar{s}(t) = (s_1, s_2, s_3, s_4)'$$

Используя формулы (1) и (2), получим выражения для  $\bar{y}(t)$ :

$$\bar{y}(t) = \begin{bmatrix} 1011 \\ 1110 \\ 0001 \\ 0100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 01 \\ 10 \\ 11 \\ 00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 + s_3 + s_4 + u_2 \\ s_1 + s_2 + s_3 + u_1 \\ s_4 + u_1 + u_2 \\ s_2 \end{bmatrix}.$$

Теперь на этой основе получим выражение

$$\bar{u}(t) = \bar{y}(t) - C\bar{s}(t) = \begin{bmatrix} s_1 + s_3 + s_4 + u_2 \\ s_1 + s_2 + s_3 + u_1 \\ s_4 + u_1 + u_2 \\ s_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_1 + s_3 + s_4 \\ s_1 + s_2 + s_3 \\ s_3 \\ s_2 \end{bmatrix}.$$

Всвязи с тем что в нашем примере ЛА задан над полем  $GF(2)$ , арифметически в этом поле операция вычитания замещается операцией  $\oplus$  (сложением по модулю 2). Для упрощения записи далее вместо этого знака будет использоваться обычный знак «+». С учетом сказанного и на основе известных тождеств булевой алгебры последняя СЛАУ принимает вид

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ u_1 \\ u_1 + u_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}.$$

Из этой системы находим координаты неизвестного входного вектора ЛА  $\bar{u}(t) = (u_1, u_2)' = (y_2, y_1)'$ , выраженные через наблюдаемые выходы на первом и втором выходных полюсах ЛА. Таким образом, в нашем примере обращенная система для рассматриваемого ЛА получилась предельно простой – она должна выполнять перестановку местами первых двух выходных каналов. Следовательно, СВК, сравнивающая реальные входы ЛА с выходами его обратной системы, также предельно проста.

Очевидно, что параметры  $l$  и  $m$  ЛА БПИ должны быть связаны неравенством  $m \geq l$ , поскольку при противоположном неравенстве восстановление неизвестной входной последовательности невозможно.

Остановимся на ситуации, когда  $m = l$ . Покажем, что тогда обращенная система в общем случае упрощается.

В [10] было введено понятие избыточного выходного канала  $y_i$  ЛА БПИ. Канал  $y_i$  называется избыточным, если в любой момент автоматного времени значение выходного сигнала на нем есть линейная комбинация значений на остальных выходных каналах ЛА. ЛА называется неизбыточным по выходам, если в нем отсутствуют избыточные выходные каналы.

Если ЛА есть автомат БПИ, то строгое неравенство  $m > l$  означает наличие в нем выходных каналов, которые для восстановления неизвестной входной последовательности излишни. Легко сообразить, что избыточный по выходам ЛА БПИ всегда можно преобразовать так, чтобы он не содержал избыточных выходов, но выполнял то же отображение «вход – выход», что и исходный автомат.

Если в системе  $D\bar{u}(t) = \bar{y}(t) - C\bar{s}(t)$  матрица  $D$  квадратная ( $l = m$ ), то в случае ЛА БПИ эта система совместна (разрешима), причем имеет единственное решение при  $|D| \neq 0$ . Из данного неравенства следует существование обратной матрицы  $D^{-1}$ . Умножая слева на нее обе части последнего соотношения, получаем

$$\bar{u}(t) = D^{-1}(\bar{y}(t) - C\bar{s}(t)).$$

Это дает возможность сразу, не решая предыдущую СЛАУ, получить неизвестные входы ЛА БПИ, выраженные через наблюдаемые выходы. Таким образом, получаемая комбинационная схема, составляющая главную часть СВК, действительно упрощается.

Проиллюстрируем изложенное на примере ЛА над полем  $GF(2)$ , у которого матрицы  $A$  и  $B$  те же, что и в предыдущем примере, а матрицы  $C$  и  $D$  таковы:

$$C = \begin{bmatrix} 0011 \\ 1001 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 01 \\ 10 \end{bmatrix}.$$

Поскольку  $rank(D) = 2$ , этот ЛА есть автомат БПИ. Вычисляя обратную матрицу, получаем  $D^{-1} = D$ . Используя те же обозначения, что и в предыдущем примере, в результате вычислений имеем

$$\bar{y}(t) = \begin{bmatrix} 0011 \\ 1001 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 01 \\ 10 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_3 + s_4 + u_2 \\ s_1 + s_4 + u_1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Используя формулу (8) и тождества булевой алгебры, получаем восстановленные с помощью обращенной системы для рассматриваемого ЛА входные сигналы:

$$\bar{u}(t) = D^{-1}(\bar{y}(t) - C\bar{s}(t)) = \begin{bmatrix} 01 \\ 10 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_3 + s_4 + s_3 + s_4 + u_2 \\ s_1 + s_4 + s_1 + s_4 + u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

Итак, для рассматриваемого ЛА его обращенная система просто переставляет компоненты выходных каналов, и потому СВК в этом случае, как и в предыдущем примере, получается очень простой.

### 3. Синтез обратной системы с задержкой для линейной динамической системы

В статье С. Ивена [11] было введено понятие автомата БПИ конечного порядка. Этот автомат, стартующий из известного начального состояния, при подаче на него произвольной входной последовательности длины  $k$  и наблюдаемой при этом выходной последовательности позволяет однозначно восстановить первый символ входной последовательности. Минимальное значение  $k$ , при котором возможно такое восстановление, называется порядком этого автомата.

Автором предлагаемой статьи в [10] было введено обобщение описанного понятия на случай, когда начальное состояние автомата неизвестно. Такой автомат назван автоматом без существенных потерь БПИ порядка  $k$  (СБПИ- $k$ ). Понятно, что обращение такого автомата может быть использо-



Используя введенные выше обозначения, запишем следующую СЛАУ в матричной форме:

$$G(k) \cdot \bar{a}(k) = \bar{y}(k). \quad (9)$$

Понятно, что в матрице  $G(k)$  первые слева  $l$  столбцов соответствуют координатам входных векторов  $\bar{u}(0), \dots, \bar{u}(k-1)$ , а следующие за ними столбцы соответствуют координатам векторов состояний  $\bar{s}(0), \dots, \bar{s}(k-1)$ . Добавим справа к этой матрице еще один столбец из компонент вектора  $\bar{y}(k)$  – наблюдаемых выходов ЛА. Рассматривая (9) как СЛАУ, используем ее для нахождения неизвестных входных векторов  $\bar{u}(0), \dots, \bar{u}(k-1)$ .

Пусть общее число строк в матрице  $G(k)$  равно  $d$ . Применим к полученной матрице метод Гаусса [12] решения СЛАУ для приведения ее к ступенчатому виду:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \dots 0 & g_{1,r+1} \dots g_{1,kl} & b_1 \\ 0 & 1 \dots 0 & g_{2,r+1} \dots g_{2,kl} & b_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots 1 & g_{r,r+1} \dots g_{r,kl} & b_r \\ 0 & 0 \dots 0 & g_{r,r+1} \dots g_{r+1,kl} & b_{r+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots 0 & g_{d,r+1} \dots g_{d,kl} & b_d \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Здесь значения  $b_1, \dots, b_d$  есть некоторые линейные комбинации координат выходных векторов  $\bar{y}(0), \bar{y}(1), \dots, \bar{y}(k-1)$ , полученные в процессе преобразования исходной системы методом Гаусса. Понятно, что в этой матрице  $d \leq m(k-1)$ . Выделим в (10) подматрицу

$$\tilde{G}(k) = \begin{bmatrix} g_{1,r+1} \dots g_{1,kl} \\ g_{2,r+1} \dots g_{2,kl} \\ \dots \\ g_{r,r+1} \dots g_{r,kl} \end{bmatrix}.$$

В [10] доказано, что если выделенная подматрица нулевая, то рассматриваемый ЛА есть СБПИ- $k$ .

Рассмотрим следующий пример. Пусть над полем  $GF(2)$  задан ЛА следующими характеристическими матрицами ( $(n=4, m=4, l=2)$ ):

$$A = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \\ 11 \\ 01 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0100 \\ 0001 \\ 0000 \\ 0100 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \\ 00 \\ 00 \end{bmatrix}.$$

Поскольку  $\text{rank}(D) = 1$ , то этот автомат не является автоматом БПИ, но пусть известно, что он есть ЛА СБПИ- $k$  при  $k = 2$ .

Предположим, что на ЛА подан неизвестный экспериментатору входной вектор  $\bar{u}(0) = (u_1(0), u_2(0))'$ , а на его выходе появился выходной вектор  $\bar{y}(0) = (1, 0, 0, 0)'$ . Построим матрицу

$$G(0) = \begin{bmatrix} 100100 y_1(0) \\ 000001 y_2(0) \\ 000000 y_3(0) \\ 000100 y_4(0) \end{bmatrix}.$$

Преобразуем ее по методу Гаусса и удалим из нее нулевые строки:

$$G(0) = \begin{bmatrix} 100100 y_1(0) \\ 000100 y_4(0) \\ 000001 y_2(0) \end{bmatrix}.$$

В этой матрице отсутствует строка вида (010000), что говорит о невозможности восстановления координаты  $u_2(0)$  входного вектора.

Пусть на ЛА подан еще один неизвестный входной вектор и на него получена наблюдаемая реакция в виде вектора  $\bar{y}(1) = (0, 0, 0, 0)'$ . Сформируем матрицу

$$G(1) = \begin{bmatrix} 10 00 01 00 y_1(0) \\ 00 00 00 01 y_2(0) \\ 00 00 00 00 y_3(0) \\ 00 00 00 100 y_4(0) \\ 00 10 01 00 y_1(1) \\ 01 00 00 01 y_2(1) \\ 00 00 00 00 y_3(1) \\ 00 00 01 00 y_4(1) \end{bmatrix}.$$

Преобразование ее по методу Гаусса с удалением нулевых строк дает матрицу

$$G(1) = \begin{bmatrix} 10\ 000000\ y_1(0) + y_4(1) \\ 01\ 000000\ y_2(0) + y_2(1) \\ 00\ 100100\ y_1(1) \\ 00\ 000100\ y_4(1) \\ 00\ 000001\ y_2(0) \end{bmatrix}.$$

В последней матрице подматрица  $\tilde{G}(1) = \begin{bmatrix} 0000 \\ 0000 \end{bmatrix}$ . Тогда из первых двух уравнений СЛАУ, соответствующих матрице  $G(1)$ , находим первый неизвестный входной вектор, поданный на ЛА:

$$u_1(0) = y_1(0) + y_4(1) = 1 + 0 = 1, u_2(0) = y_2(0) + y_2(1) = 0 + 0 = 0. \quad (11)$$

Опишем способ построения обращенной системы для ЛА СБПИ- $k$ . Она представляет собой схему с памятью, содержащую  $m$  сдвиговых регистров из  $k$  штук единичных задержек  $Z_i (i = 1, 2, \dots, k-1)$  и комбинационную схему с  $l$  выходами  $u_i (i = 1, 2, \dots, l)$ . В качестве входа  $i$ -й сдвиговый регистр получает сигнал с  $i$ -го выходного канала  $y_i (i = 1, 2, \dots, m)$  ЛА. Этот сигнал в последующих тактах последовательно сдвигается в задержки  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{k-1}$  сдвигового регистра. Входами комбинационной схемы обращенной системы являются сигналы со всех выходных каналов ЛА и с выходов всех единичных задержек  $m$  сдвиговых регистров. Комбинационная схема должна реализовать  $l$  булевых функций  $u_1, u_2, \dots, u_l$ , каждая из которых есть линейная комбинация значений, снимаемых с выходных каналов ЛА и с выходов задержек сдвиговых регистров.

В рассматриваемом примере обращенная система для ЛА имеет два регистра, содержащих по одной единичной задержке. Комбинационная схема обращенной системы реализует две булевы функции –  $u_1$  и  $u_2$ , представленные в соотношении (11).

## Заключение

В работе описаны методы построения обращенных систем, предназначенных для использования в качестве основных компонентов СВК, применяемых для функционального контроля.

Математической моделью исходной линейной дискретной динамической системы служит классическая линейная последовательностная машина (линейный автомат). В работе показано, что в случае, когда исходная система есть система без потери информации, в том числе и одна из ее модификаций (СБПИ- $k$ ), обращенная система оказывается достаточно простой.

Описаны методы синтеза таких обращенных систем, основанные на применении хорошо разработанного математического аппарата решения систем линейных алгебраических уравнений.

Представленные в статье результаты направлены на разработку методов построения обращенных систем для дискретных линейных систем, заданных над любыми конечными полями, что дает возможность использовать их для конструирования связки устройств кодер-декодер. Это обстоятельство расширяет область их применения – и для решения задач кодирования информации.

### Библиографический список

1. Schutter B. Minimal State-Space Realization in Linear System Theory. An Overview / B. Schutter // *Journal Comp. and Appl. Math.* – 2000. – Vol. 121. – Pp. 331–354.
2. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
3. Eilenberg S. Automata, Languages and Machines / S. Eilenberg. – N. Y. – L. : Acad. Press, 1974. – 387 p.
4. Ильин А. В. Методы робастного управления динамических систем / А. В. Ильин, С. К. Коровин, И. И. Фомичев. – М. : Физматлит, 2009. – 219 с.
5. Пушков С. Г. Обращение линейных систем на основе реализации в пространстве состояний / С. Г. Пушков // *Изв. РАН. Теория и системы управления.* – 2018. – № 1. – С. 9–19.
6. Ковалев Ф. М. Обратимые динамические системы с переменной размерностью в задачах криптографического преобразования информации / Ф. М. Ковалев, В. А. Козловский, В. Ф. Щербак // *Прикладная дискретная математика.* – 2008. – № 2. – С. 39–44.
7. Основы технической диагностики / Под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1976. – 464 с.
8. Гилл А. Линейные последовательностные машины. Анализ, синтез и применение / А. Гилл. – М. : Наука, 1974. – 288 с.
9. Huffman D. A. Canonical forms for information lossless finite-state logical machines / D. A. Huffman // *IRE Trans. Circuit Theory. Special supplement.* – 1959. – Vol. CT-6. – Pp. 41–59.
10. Сперанский Д. В. Лекции по теории экспериментов с конечными автоматами / Д. В. Сперанский. – М. : Интернет университет информационных технологий ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 287 с.
11. Even S. On information lossless automata of finite order / S. Even // *IEEE Trans. Elect. Comput.* – 1965. – Vol. C-14. – N 4. – Pp. 561–569.
12. Курош А. Г. Курс высшей алгебры / А. Г. Курош. – СПб. : Лань, 2008. – 432 с.

*Dmitry V. Speranskiy*  
Russian University of Transport, Moscow

### **Functional control of linear dynamic by system reversion method**

A method for the synthesis of an reversed system for a given discrete linear dynamic system is proposed. The reversed system is designed to restore (invert) an unknown input signal of a discrete system from its observable output. Such an reversion is now especially relevant if it can be performed at the same temp as the operation of the original system. The demand is explained by the possibility of measuring the instantaneous values of physical quantities.

This feature is very important because it allows to solve many pressing problems. These include the problems of identifying systems, planning motion paths in robotics, control and diagnostic of digital systems.

The article deals with the problem of synthesizing an reversed system for two types of linear systems, called information lossless systems. It is shown that for them the solution of such a problem is reduced to solving systems of linear algebraic equations. The mathematical apparatus for solving them has long been well developed. For systems of large dimensionality, in practical applications, for example, the Gauss method is used. In the article the application of this method for the synthesis of an reversed system is illustrated.

The constructed reversed system can be used as the main component of embedded control circuits used for functional control of linear dynamic systems.

technical diagnostics; functional control system; linear systems; lossless system; Gauss method for solving systems of linear algebraic equations

### **References**

1. Schutter B. (2000). Minimal State-Space Realization in Linear System Theory. An Overview. *Journal Comp. and Appl. Math*, vol. 121. – Pp. 331–354.
2. Kalman R., Falb P., Arbib M. (2004). *Topics in Mathematical System Theory [Ocherki po matematicheskoy teorii system]*. Moscow, Editorial URSS. – 400 p.
3. Eilenberg S. (1974). *Automata, Languages and Machines*. New York, London, Acad. Press. – 387 p.
4. Ilyin A. V., Korovin S. K., Fomichev I. I. (2009). *Methods of robust control of dynamical systems [Metody robastnogo upravleniya dinamicheskikh system]*. Moscow, Fizmatlit. – 219 p.
5. Pushkov S. G. (2018). Reversion of linear systems based on the implementation in state space. [Obrashchenie linejnyh sistem na osnove realizacii v prostranstve sostoyanij] *Izv. PAS. Theory and control systems [Izv RAN Teoriya i sistemy upravleniya]*, N 1. – Pp. 9–19.
6. Kovalev F. M., Kozlovsky V.A., Scherbak V. F. (2008). Reversible dynamical systems with variable dimension in problems of cryptographic transformation of information [Obratimye dinamicheskie sistemy s peremennoj razmernostyu v zadachah

- kriptograficheskogo preobrazovaniya informacii]. Applied discrete mathematica [Prikladnaya diskretnaya matematika], N 2. – Pp. 39–44.
7. Parkhomenko P. P. (1976). Fundamentals of technical diagnostics [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki]. Moscow, Energy. – 464 p.
  8. Gill A. (1974). Linear sequential circuits. Analysis synthesis and applications [Linejnye posledovatelnostnye mashiny Analiz sintez i primenenie]. Moscow, Nayka. – 288 p.
  9. Huffman D. A. (1959). Canonical forms for information lossless finite-state logical machines. IRE Trans. Circuit Theory. Special supplement, vol. CT-6. – Pp. 41–59.
  10. Speranskiy D. V. (2010). Lectures on the theory of experiments with finite automata [Lekcii po teorii ehksperimentov s konechnymi avtomatami]. Moscow, Internet University of Information Technology, BINOM. Laboratory of Knowledge. – 287 p.
  11. Even S. (1965). On information lossless automata of finite order. IEEE Trans. Elect. Comput, vol. C-14, N 4. – Pp. 561–569.
  12. Kurosh A. G. (2008). The course of higher algebra [Kurs vyshej algebrы]. St. Petersburg, Lan. – 432 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 15.10.2018, принята к публикации 28.11.2018*

*СПЕРАНСКИЙ Дмитрий Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Российского университета транспорта, Москва.

e-mail: speranskiy.dv@gmail.com

© Сперанский Д. В., 2019

УДК 681.518.3:004.3.122

**В. А. Засов, канд. техн. наук**Кафедра «Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте»,  
Самарский государственный университет путей сообщения**КОМПЕНСАЦИЯ ПОМЕХ В ПРИЕМНИКАХ СИГНАЛОВ  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ**

В условиях априорной неопределенности характеристик помех для повышения помехозащищенности систем автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа в приемниках сигналов целесообразно применять методы адаптивной компенсации помех. Целью работы является исследование возможностей одного из методов адаптивной обработки сигналов – адаптивной фильтрации помех – для повышения помехоустойчивости приема сигналов систем автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа. Решены следующие задачи: разработана математическая модель принимаемых сигналов на входах приемных устройств систем; обоснованы функциональная схема и алгоритм адаптации базового и модифицированного многоканальных адаптивных фильтров для приемных устройств систем; произведено компьютерное моделирование работы рассмотренных адаптивных фильтров, подтверждающее достоверность полученных результатов и их эффективность для компенсации помех. Отличительной особенностью предложенных для компенсации помех в сигналах систем автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа адаптивных фильтров, существенно расширяющей их функциональные возможности, является использование в алгоритмах адаптации априорной информации о наличии пауз в сигналах данных систем.

автоматическая локомотивная сигнализация; компенсация помех; математическая модель; адаптивные фильтры; алгоритм адаптации; паузы в сигналах; компьютерное моделирование

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-32-44.

**Введение**

В системах автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) процесс передачи электрическими сигналами сообщений на локомотивы по рельсовым линиям ходового пути подвержен интенсивным воздействиям помех различной физической природы [1–3].

В первую очередь приемные локомотивные устройства АЛСН (индуктивные приемные катушки, посредством которых сигналы из рельсовой линии поступают в локомотив) подвергаются постоянному и сильному воздействию гармонических, шумовых и импульсных помех от протекающих по рельсам тяговых токов и их гармоник [1, 2, 4, 5].

Существенным источником помех для приемных устройств АЛСН являются воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), электромагнитное поле которых создает гармонические помехи в местах сближения ЛЭП с железной дорогой [6].

Экспериментально установлено, что разность высот подвески к корпусу локомотива приемных катушек АЛСН, разброс их электрических параметров, а также колебания локомотивных приемных катушек АЛСН вызывают наводку в катушках ЭДС помех с частотой, зависящей от скорости движения локомотива [2]. Похожей причиной помех является неравномерная намагниченность рельсов с объемной закалкой [там же]. Таким образом, система АЛСН, обеспечивающая безопасность движения поездов, функционирует в условиях воздействия разнообразных случайных помех от многих источников, поэтому подавление помех для повышения надежной работы АЛСН является актуальной задачей.

В ряде случаев для устранения источников помех важно также выделить сигналы помех, чтобы определить их физическую природу, т. е. идентифицировать источники помех [7]. Это необходимо производить, например, в вагонах-лабораториях автоматики и телемеханики железных дорог, осуществляющих мониторинг – контроль и диагностику состояния рельсовых цепей и систем АЛСН.

Характерной особенностью вышеописанных помех является априорная неопределенность и изменчивость во времени статистических закономерностей и параметров мешающих сигналов [3], что снижает эффективность устройств обработки сигналов АЛСН, ориентированных на априорные данные о помехах [3, 8]. Поэтому в условиях априорной неопределенности характеристик помех для повышения помехозащищенности систем АЛСН в приемниках сигналов АЛСН целесообразна адаптивная компенсация помех.

Целью работы является исследование возможностей одного из методов адаптивной обработки сигналов – адаптивной фильтрации (АФ) помех [9, 10] для повышения помехоустойчивости приема сигналов АЛСН.

Необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель принимаемых сигналов на входах приемных устройств АЛСН;
- обосновать функциональные схемы и алгоритмы работы адаптивных фильтров для приемных устройств АЛСН;
- произвести моделирование работы предложенных адаптивных фильтров для подтверждения достоверности полученных результатов и оценки их эффективности для компенсации помех.

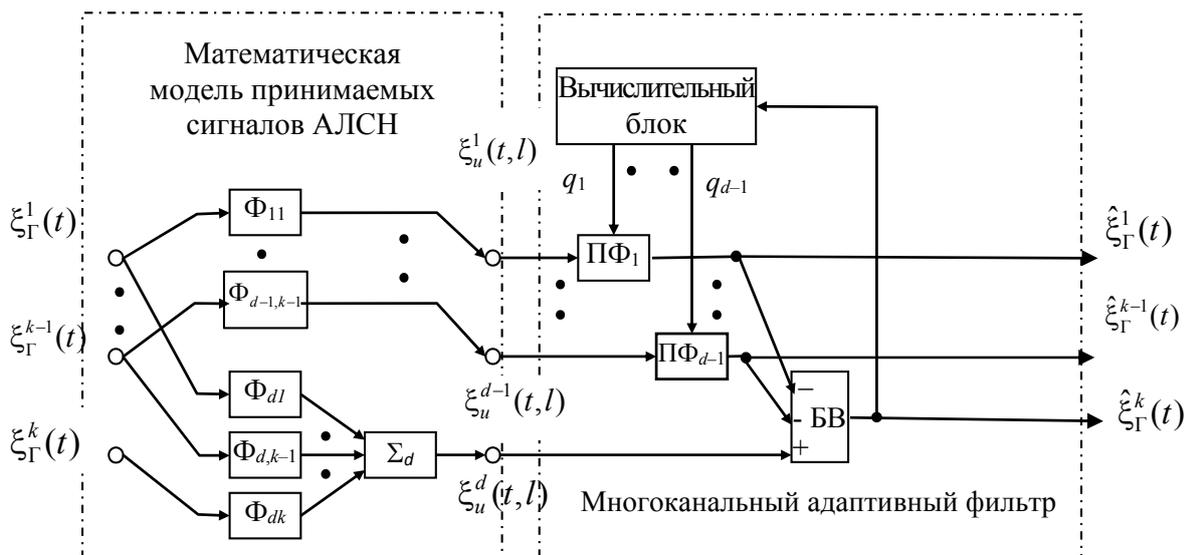
## 1. Многоканальный адаптивный фильтр для компенсации помех в приемниках сигналов систем автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа

Модель принимаемых сигналов на входе приемных устройств АЛСН представим в виде многоканальной системы передачи сигналов (рис. 1), которая имеет  $k$  источников сигналов (входов)  $\xi_{\Gamma}^s(t)$ ,  $s = \overline{1, k}$  и  $d$  приемников сигналов (выходов), сигналы на которых обозначим  $\xi_u^p(t, l)$ ,  $p = \overline{1, d}$ , причем источники сигналов некоррелированы (независимы) и  $d = k$ . Каждый из  $d$  выходов такой многоканальной системы связан с  $k$  входами линейными каналами преобразования и передачи сигналов – информационными каналами  $\Phi_{ps}$ , где  $p = \overline{1, d}$  и  $s = \overline{1, k}$  с динамическими характеристиками  $h_{ps}(t, l)$  или  $H_{ps}(\omega, l)$ , которые в общем случае не являются постоянными, что отражается введением независимой переменной  $l$  [7].

Сигнал  $\xi_u^d(t, l)$  на выходе  $d$  модели соответствует сигналу с выхода приемных катушек АЛСН и равен сумме сигналов  $\xi_{\Gamma}^s(t)$ ,  $s = \overline{1, k-1}$  от  $k-1$  источников помех и кодового сигнала  $\xi_{\Gamma}^k(t)$  АЛСН из рельсовой линии, определяющего сигнальные показания светофора. Другими словами, это аддитивная смесь сигнала АЛСН и помех. Сигналы  $\xi_u^p(t, l)$ ,  $p = \overline{1, d-1}$  – это сигналы, передающие информацию о помехах и измеряемые дополнительными токовыми и индуктивными датчиками, установленными на локомотиве. Учитывая различную физическую природу помех, положим, что сигнал на выходе каждого из указанных  $d-1$  приемников зависит от сигнала только одного из источников, а сигналы от других узлов, поступающие на приемник, малы и ими можно пренебречь. Другими словами, перекрестные каналы передачи сигналов для этой группы из  $d-1$  приемников отсутствуют. Сигналы  $\xi_u^p(t, l)$ ,  $p = \overline{1, d-1}$  этой группы выходов модели назовем опорными. Рассмотренную графическую модель принимаемых на входе системы АЛСН сигналов представим в виде математической модели, описываемой следующей системой интегральных уравнений:

$$\begin{cases} \xi_{\Gamma}^1(t) * h_{11}(t, l) = \xi_u^1(t, l) \\ \dots \\ \xi_{\Gamma}^{k-1}(t) * h_{(d-1)(k-1)}(t, l) = \xi_u^{d-1}(t, l), \\ \sum_{s=1}^k \xi_{\Gamma}^s(t) * h_{ds}(t, l) = \xi_u^d(t, l), \end{cases}$$

где знак  $*$  обозначает свертку.



**Рис. 1.** Модель принимаемых сигналов АЛСН и функциональная схема многоканального адаптивного фильтра

Очевидно, для такой математической модели практический интерес представляет определение составляющей кодового сигнала  $\xi_{\Gamma}^k(t)$  из аддитивной смеси  $\xi_u^d(t,l)$  кодового сигнала и сигналов  $\xi_{\Gamma}^s(t), s = \overline{1, k-1}$  помех на выходе приемных катушек, т. е. сигнала, генерируемого  $k$ -м источником или преобразованного каналом  $\Phi_{dk}$  сигнала  $\xi_{\Gamma}^k(t) * h_{dk}(t,l) = \tilde{\xi}_{\Gamma}^k(t)$ . Этот сигнал  $\tilde{\xi}_{\Gamma}^k(t)$  на  $k$ -м входе блока  $\Sigma_d$  суммирования не искажен помехами, линейно связан с сигналом  $\xi_{\Gamma}^k(t)$  и поэтому достоверно определяет кодовый сигнал АЛСН [7, 11].

Решение системы интегральных уравнений на с. 34 обычно достигается путем минимизации значения целевой функции

$$F^d(q) = E[\xi_u^d(t,l) - \sum_{p=1}^{d-1} \xi_u^p(t,l) * q_p(t,l)]^2,$$

где  $E\{\dots\}$  – среднее значение заключенной в скобках величины; параметр  $q_p(t), p = \overline{1, d-1}$  – импульсные переходные характеристики перестраиваемых фильтров  $\text{ПФ}_p, p = \overline{1, d-1}$ .

Группа ПФ входит в состав многоканального адаптивного фильтра (МАФ), функциональная схема которого изображена на рис. 1. Поскольку в сигнале  $\xi_u^d(t,l)$  аддитивные составляющие  $\xi_{\Gamma}^s(t) * h_{ds}, s = \overline{1, k-1}$  коррелированы с опорными сигналами  $\xi_u^p(t,l) * q_p, p = \overline{1, d-1}$ , при  $d = s$  минимум целевой функции  $F^d(q)$  равен  $\min F^d(q) = E[\xi_{\Gamma}^k(t) * h_{dk}(t,l)]^2$ .

В процессе работы вычислительный блок МАФ осуществляет вычисление таких параметров (весов)  $q_p(t)$ ,  $p = \overline{1, d-1}$  перестраиваемых фильтров ПФ<sub>p</sub>,  $p = \overline{1, d-1}$ , при которых значение целевой функции  $F^d(q)$  будет минимальным [7, 11]. Другими словами, при достижении минимума целевой функции  $F^d(q)$  вычисленный сигнал  $\hat{\xi}_\Gamma^k(t)$  на выходе блока вычитания МАФ близок по критерию наименьших квадратов составляющей кодированного сигнала  $\tilde{\xi}_\Gamma^k(t)$  АЛСН из аддитивной смеси сигналов на выходе приемных катушек.

Таким образом, происходит компенсация помех в аддитивной смеси «сигнал АЛСН – сигналы помех» на выходе приемных катушек в условиях, когда динамические характеристики (импульсные переходные характеристики)  $h_{ps}(t, l)$ ,  $p = \overline{1, d}$  и  $s = \overline{1, k}$  каналов неизвестны и при движении постоянно изменяются. Кроме того, сигналы  $\hat{\xi}_\Gamma^1(t), \dots, \hat{\xi}_\Gamma^{k-1}(t)$  на выходах ПФ (входах блока вычитания БВ) после завершения процесса адаптации близки по критерию наименьших квадратов соответствующим сигналам помех  $\xi_\Gamma^1(t), \dots, \xi_\Gamma^{k-1}(t)$ , поэтому могут использоваться для анализа источников помех при мониторинге системы АЛСН, например мобильными вагонами-лабораториями.

Среди многочисленных алгоритмов адаптации [9, 10], приводящих к минимуму целевую функцию  $F^d(q)$  – алгоритмов Ньютона, наискорейшего спуска, по критерию наименьшего среднего квадрата (LMS – Least Mean Square), рекурсивного по критерию наименьших квадратов (RLS – Recursive Least Square) и других – для рассмотренного выше МАФ выбран алгоритм адаптации LMS.

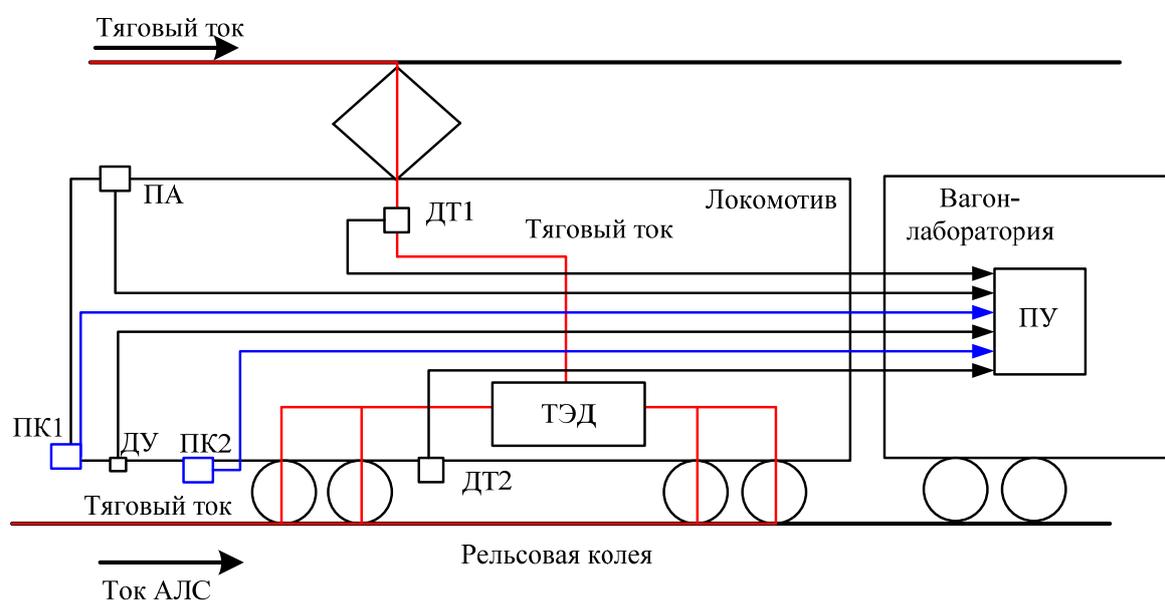
Данный алгоритм выгодно отличается наименьшей вычислительной сложностью среди известных алгоритмов адаптивной фильтрации [9, 10]. Для каждого шага расчета  $N$  весов ПФ по этому алгоритму требуется выполнить  $N+1$  пар операций «умножение – сложение». Это важное преимущество алгоритма LMS используется для обеспечения реального масштаба времени обработки сигналов АЛСН встраиваемыми вычислительными устройствами (микроконтроллерами, сигнальными процессорами, программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС)), имеющими, как правило, ограниченные вычислительные ресурсы. Для сравнения: число операций в алгоритме RLS квадратично возрастает с увеличением порядка  $N$  ПФ [9, 10].

Существенной особенностью исследований по адаптивной фильтрации сигналов АЛСН является применение многоканальной адаптивной обработки сигналов помех [7, 11]. Для измерения сигналов помех  $\xi_u^1(t, l), \dots, \xi_u^{d-1}(t, l)$ , поступающих на опорные входы МАФ, предлагается использо-

вать приемники сигналов, один из вариантов схемы расположения которых на локомотиве приведен на рис. 2.

Это следующие приемники:

- ПА помех от воздушных ЛЭП;
- ДТ1 (например, токовый датчик LT 1000-SI) помех, возникающих при коммутации электрических цепей тяговых электродвигателей (ТЭД), нарушений контакта пантографа и контактного провода;
- ДТ2 помех от обратных тяговых токов при движении локомотива на станциях, кабельных ЛЭП, а также намагниченности рельсов;
- ДУ помех из-за колебаний приемных катушек – двух дополнительных ПК1 и двух штатных локомотивных ПК2.



**Рис. 2.** Вариант схемы расположения приемников сигналов АЛСН и помех на локомотиве

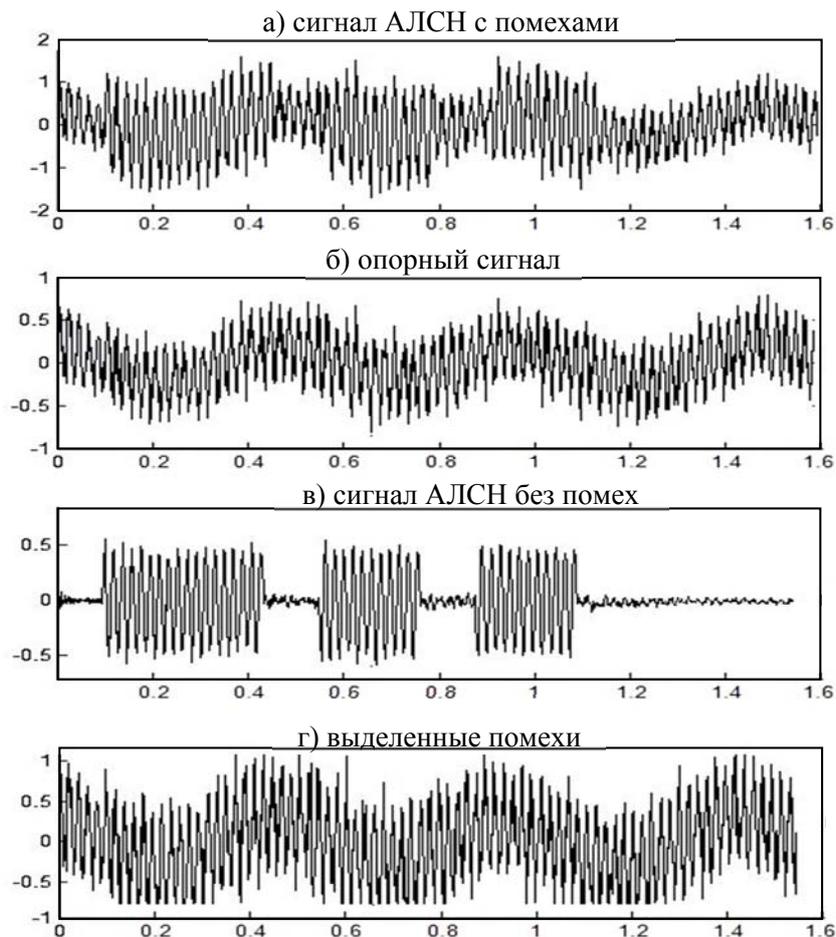
Приведенная на рис. 2 пара навесных приемных катушек ПК1 устанавливается дополнительно при использовании вагона-лаборатории для мониторинга систем АЛСН. На рисунке показан обобщенный вариант схемы расположения приемников сигналов, потенциально мешающих работе АЛСН и служащей для пояснения предлагаемого подхода к адаптивной компенсации помех. Конечно, вклад каждого из видов помех различен, как и условия их влияния на разных полигонах железных дорог.

Число входов МАФ (количество приемников помеховых сигналов) при необходимости несложно масштабировать, учитывая особенности условий эксплуатации АЛСН. Все приемники помех – индуктивные (обмотки на сердечниках) датчики, сигналы от которых, вместе с сигналами локомотивных приемных катушек, поступают через согласующие усили-

тели на входы МАФ, входящего в состав приемного устройства сигналов АЛСН. Приемное устройство может находиться как в локомотиве (в штатном режиме используются приемные катушки ПК2), так и в вагонелaborатории (в режиме мониторинга системы АЛСН используются дополнительные навесные приемные катушки ПК1).

Средствами математического пакета MATLAB произведено моделирование адаптивной компенсации помех в сигналах АЛСН с помощью рассмотренного выше МАФ. Результаты моделирования приведены на рис. 3. Для моделирования МАФ использовались адаптивные фильтры, реализующие алгоритм адаптации LMS, число весов МАФ – 32, частота дискретизации сигналов – 1000 Гц, разрядность цифрового кода равна 8. На рис. 3 показаны: а) сигнал АЛСН (код зеленого огня светофора) с помехами; б) сигналы помех на опорных входах МАФ; в) сигнал АЛСН (код зеленого огня светофора), в котором помехи подавлены; г) выделенные помехи (для возможного анализа их природы).

Результаты моделирования демонстрируют эффективность компенсации помех с помощью предложенного МАФ за время, не превышающее период следования кодов АЛСН.



**Рис. 3.** Результаты моделирования компенсации помех МАФ с определением вкладов полезного сигнала АЛСН и помех в выходном сигнале приемных катушек

## 2. Модифицированный адаптивный фильтр, использующий паузы при адаптации в сигналах систем автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа

Недостатком рассмотренного выше МАФ является существенное искажение выделенных из помех полезных сигналов в случаях, когда полезные сигналы и сигналы помех коррелированы. Применительно к сигналам АЛСН это случай, когда помехи являются гармоническими сигналами с частотами, равными или близкими частотам несущих сигналов АЛСН. Например, помехи от ЛЭП на участках с электрической тягой постоянного тока и тепловозной тягой, когда устройства АЛСН работают на частоте 50 Гц [2]. В этом случае происходит подавление как гармонической помехи, так и сигнала АЛСН.

Для устранения данного недостатка предлагается модифицированный МАФ, в котором алгоритм адаптации использует априорную информацию о наличии пауз (интервалов) в сигналах АЛСН [12]. Функциональная схема модифицированного МАФ изображена на рис. 4.

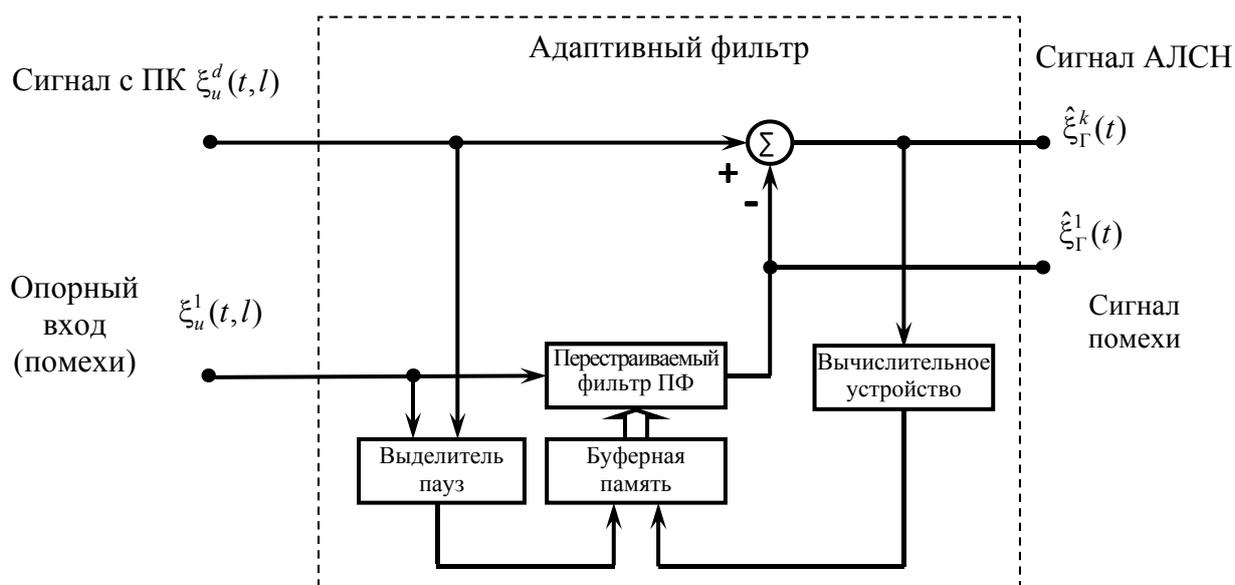


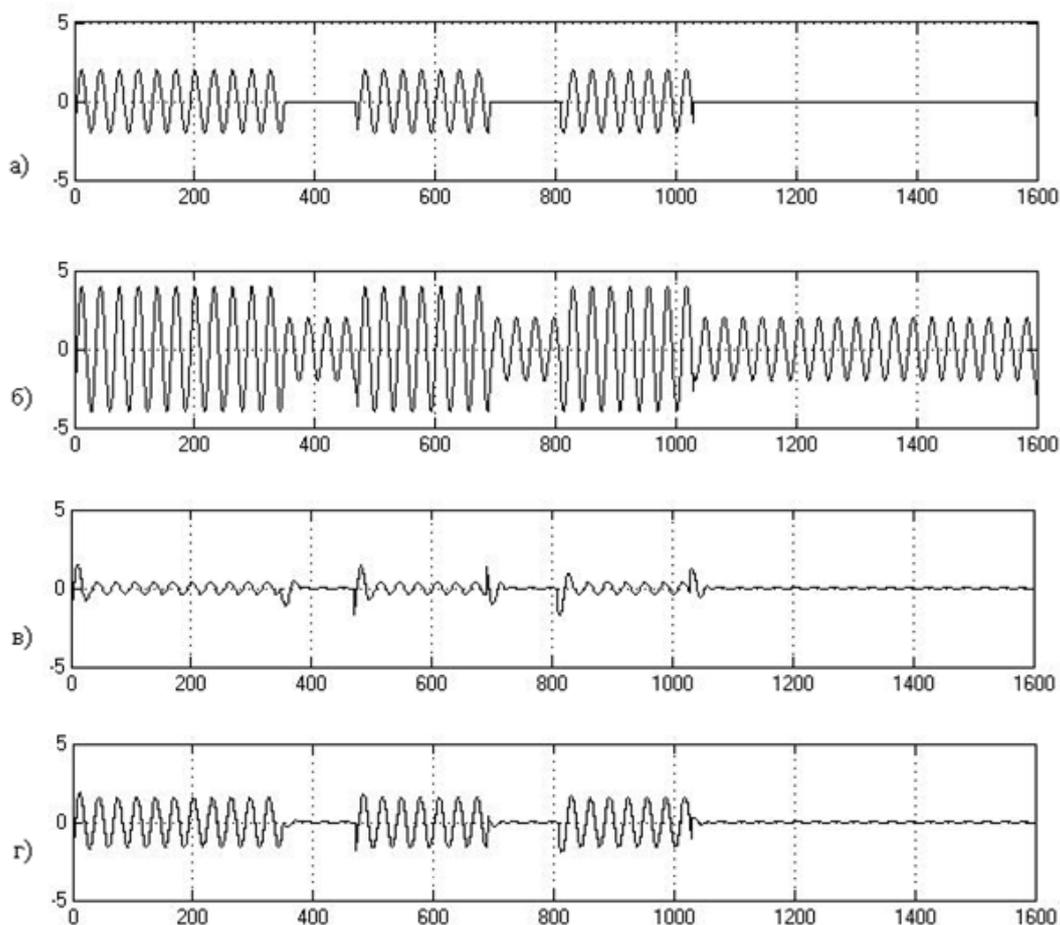
Рис. 4. Функциональная схема модифицированного адаптивного фильтра, использующего априорную информацию о паузах (интервалах) в сигналах АЛСН

В предлагаемом АФ [12] вычисление весовых коэффициентов перестраиваемого фильтра (настройка АФ) производится только в паузах, т. е. при отсутствии сигнала  $\xi_u^d(t, l)$  АЛСН или когда его мощность ниже установленного порога.

При наличии сигнала (вне паузы) разделение сигнала производится в перестраиваемом фильтре с весовыми коэффициентами, вычисленными в конце предшествующей паузы и записанными в буферную память. Из-за

запрета адаптации при наличии сигнала  $\xi_u^d(t, l)$  подавляется (вычитается) только сигнал  $\xi_u^1(t, l)$  от источников помех, а сигнал  $\xi_u^d(t, l)$  не подавляется. Выделение пауз в сигнале  $\xi_u^d(t, l)$  можно производить, например, путем вычисления величины мощности сигнала на сигнальном входе АФ и сравнения этой величины с порогом.

Средствами математического пакета MATLAB произведено моделирование адаптивной компенсации гармонических помех в сигналах АЛСН с помощью предложенного модифицированного АФ, использующего априорную информацию о паузах в сигналах. Результаты моделирования приведены на рис. 5. Условия проведения моделирования такие же, как в эксперименте с адаптивной компенсацией базовым МАФ.



**Рис. 5.** Результаты моделирования компенсации гармонических помех в сигналах АЛСН модифицированным адаптивным фильтром, использующим априорную информацию о паузах в сигналах

На рис. 5 показаны: а) сигнал АЛСН (код зеленого огня светофора); б) аддитивная смесь сигнала АЛСН и гармонической помехи с частотой, равной частоте несущей сигнала АЛСН; в) неудовлетворительные для практики результаты компенсации гармонической помехи в сигнале АЛСН базовым МАФ; г) результаты компенсации гармонической помехи в сигнале АЛСН модифицированным АФ, использующим априорную информацию о паузах в сигналах АЛСН.

Практическая реализация предложенных АФ обеспечивается многочисленными серийно выпускаемыми типами вычислительных устройств для встраиваемых приложений: микроконтроллерами и мобильными компьютерами [13], сигнальными процессорами [14], ПЛИС, например [15], методами, алгоритмами и различными программами для цифровой обработки сигналов [16].

## Заключение

На основе разработанной нами математической модели принимаемых сигналов на входах приемных устройств АЛСН обоснованы функциональные схемы и алгоритмы адаптации базового и модифицированного многоканальных АФ для приемных устройств АЛСН.

Отличительной особенностью предложенных для компенсации помех в сигналах АЛСН АФ, существенно расширяющей их функциональные возможности, является использование в алгоритмах адаптации априорной информации о наличии пауз (интервалов) в сигналах АЛСН.

Компьютерное моделирование работы рассмотренных АФ подтверждает достоверность полученных результатов и их эффективность для компенсации помех.

## Библиографический список

1. Леонов А. А. Техническое обслуживание автоматической локомотивной сигнализации / А. А. Леонов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 255 с.
2. Кравцов Ю. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута, И. М. Кокурин, В. А. Кононов, Л. И. Борисенко, П. Ф. Бестемьянов, И. В. Беляков, И. Д. Долгий, Л. В. Пальчик. – М. : Транспорт, 1996. – 400 с.
3. Горелов Г. В. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте / Г. В. Горелов, А. Ф. Фомин, А. А. Волков, В. К. Котов. – М. : УМЦ образования на железнодорожном транспорте, 2013. – 532 с.
4. Шаманов В. И. Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 10. – С. 5–9.
5. Леушин В. Б. Помехоустойчивость приемников АЛСН при приеме кодовых комбинаций в условиях действия флуктуационных помех / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Э. К. Блачев, Н. Р. Барашкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2009. – № 3 (19). – С. 39–41.

6. Леушин В. Б. Влияние помех от высоковольтных ЛЭП на работу приемников канала АЛСН локомотивного устройства безопасности КЛУБ / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Э. К. Блачев, Н. Р. Барашкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2009. – № 3 (19). – С. 33–48.
7. Засов В. А. Алгоритмы и устройства для идентификации входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов / В. А. Засов, М. А. Тарабардин, Е. Н. Никоноров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева. – 2009. – № 2 (18). – С. 115–122.
8. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
9. Naykin S. Adaptive filter theory / S. Naykin. – 4 edition. – Prentice Hall, 2001. – 936 p.
10. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В. И. Джиган. – М. : Техносфера, 2013. – 528 с.
11. Засов В. А. Алгоритмы контроля устойчивости решения задачи разделения источников сигналов в условиях априорной неопределенности / В. А. Засов, Е. Н. Никоноров // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-10) : мат-лы российской с международным участием конференции. – М. : Изд-во РАН ; Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2010. – С. 482–491.
12. Пат. № 148878. Адаптивный компенсатор помех в прерывистых сигналах / Засов В. А., Ромкин М. В. ; 12.08.2014. Оpubл. 20.12.2014, бюл. № 35.
13. Дмитриев В. В. Разработка устройства контроля параметров автоматической локомотивной сигнализации на базе современного смартфона / В. В. Дмитриев, Д. М. Смирнов // Автоматика на транспорте. – 2016. – № 4. – С. 497–512.
14. Сперанский В. С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники / В. С. Сперанский. – М. : Горячая линия – Телеком. – 2008. – 170 с.
15. Глазков В. В. Программируемые логические интегральные схемы фирмы Altera / В. В. Глазков ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М. : Горячая линия – Телеком, 2014. – 53 с.
16. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

*Valeriy A. Zasov*

«Mechatronics, Automation and Control in Transport» department  
Samara State Transport University

### **Compensation of noise in signal receivers automatic locomotive signaling**

Under conditions of a priori noise uncertainty, it is effective to use adaptive compensation of noise techniques to improve noise protection of continuous automatic locomotive signaling (CALS) receivers. The purpose of this article is to study the possibilities of an adaptive signal-processing technique, adaptive noise filtration (AF), providing better noise resistance of the CALS signals. To achieve this goal, the following problems are solved: a mathematical model of the CALS receivers' input signals is developed, a functional circuit and adaptation algorithm of a basic and a modified multichannel CALS receivers' adaptive filters is substantiated, and a computer simulation of adaptive filters is performed, confirming the accuracy of the obtained results and effectiveness of such filters for noise reduction. A distinctive feature of the proposed filters, which significantly

expands their functionality, is a priori information on the presence of breaks in the CALS signals used in the adaptive algorithms.

automatic locomotive signaling; compensation of noise; mathematical model; adaptive filters, adaptive algorithm; breaks in signals; computer simulation

## References

1. Leonov A. A. (1982). Maintenance of automatic train signals [Tekhnicheskoe obsluzhivanie avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii], 5th edition, revised and enlarged. Moscow, Transport. – 255 p.
2. Kravtsov Yu. A., Nesterov V. L., Lekuta G. F., Kokurin J. M., Kononov V. A., Borisenko L. J., Bestemianov P. F., Belyakov J. V., Dolgi J. D., Palchik K. V. (1996). Systems of Railway Automatics and Telemechanics [Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow, Transport. – 400 p.
3. Gorelov G. V., Fomin A. F., Volkov A. A., Kotov V. K. (2013). The theory of signals transferring at railways [Teoriya peredachi signalov na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow, EMC of education on railway transport [UMC obrazovaniya na zheleznodorozhnom transporte]. – 532 p.
4. Shamanov V. I. (2014). Modeling of noise generation by currents of a rail traction network [Modelirovaniye generatsii pomekh tokami relsovoy tyagovoy seti]. Automation, communication, computer science [Avtomatika, svyaz, informatika], issue 10. – Pp. 5–9.
5. Leushin V. B., Yusupov R. R., Blachev E. K., Barashkova N. R. (2009). The interference immunity of CALS receivers when receiving code combinations under conditions of action of fluctuation noise [Pomehoustoychivost priemnikov ALSN pri prieme kodovykh kombinatsiy v usloviyakh deystviya fluktuatsionnykh pomekh]. Volga transport bulletin [Vestnik Transporta Povolzh'ya], issue 3. – Pp. 39–41.
6. Leushin V. B., Yusupov R. R., Blachev E. K., Barashkova N. R. (2009). How noises induced by high-voltage power transmission line influence onto continuous automatic locomotive signaling receivers operation at KLUB safety device for locomotive [Vliaynie pomekh ot visokovoltnykh LEP na pabotu priemnikov kanala ALSN lokomotivnogo ustroystva bezopasnosti CLUB]. Volga transport bulletin [Vestnik Transporta Povolzh'ya], issue 3. – Pp. 33–48.
7. Zasov V. A., Nikonorov E. N., Tarabardin M. A. (2009). Algorithms and devices for identification of input signals in problems of control and diagnostics of dynamic objects [Algoritmy i ustroystva dlya identifikatsii vhodnykh signalov v zadachah kontrolya i diagnostiki dinamicheskikh ob'ektov]. Bulletin of Samara state aerospace university behalf of S. P. Korolev [Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im S. P. Koroleva], issue 2 (18). – Pp. 115–122.
8. Shamanov V. I. (2013). Security of locomotive receivers ALS from noise. [Zaschischennost lokomotivnykh priemnikov ALS ot pomekh]. Automation, communication, computer science [Avtomatika, svyaz, informatika], issue 4. – Pp. 14–19.
9. Haykin S. (2001). Adaptive Filter Theory, 4-ed. Prentice Hall. – 936 p.
10. Dzhigan V. I. (2013). Signals Adaptive Filtering: Theory and Methods [Adaptivnaya fil'tratsiya signalov: teoriya i algoritmy]. Moscow, Tekhnosfera. – 528 p.
11. Zasov V. A., Nikonorov E. N. (2010). Algorithms for Verifying the Stability of a Solution to the Problem of Separating Signal Sources under Conditions of Prior Uncer-

- tainty [Algoritmyi kontrolya ustoychivosti resheniya zadachi razdeleniya istochnikov signalov v usloviyah apriornoy neopredelennosti]. Published in Hardware and Software Means for Management, Control, and Measurement Systems: Proceedings of a Conference with Russian and International Attendance [Tehnicheskie i programmnyie sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya (UKI-10): materialyi rossiyskoy s mezhdunarodnyim uchastiem konferentsii]. Moscow, Russian Academy of Sciences, Trapeznikov Institute of Control Sciences Press. – Pp. 482–491.
12. Zasov V. A., Romkin M. V. (2014). Adaptive compensation of noise in intermittent signals [Adaptivnyiy kompensator pomeh v preryivistyih signalah], RF Patent 148878 [Patent na poleznuyu model N 148878 ot 12.08.2014], Byull. Izobret., issue 35.
  13. Dmitriev V. V., Smirnov D. M. (2016). Design of parameter control device for continuous automatic train signaling system on the base of a modern smartphone [Razrabotka ustroystva kontrolya parametrov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii na baze sovremennogo smartfona], Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, issue 4. – Pp. 497–512.
  14. Speransky V. S. (2008). Signaling microprocessors and their application in telecommunications and electronics systems [Signal'nie mikroprocessori i ih primenenie v sistemah telekommunikatsiy i elektroniki]. Moscow, Hot line-Telecom [Gor'achay linia – Telekom]. – 170 p.
  15. Glaskov V. V. (2014). Programmable logic integrated circuits of Altera [Programmiruemie logicheskie integral'nie shemi firmi Altera]. Moscow, Hot line-Telecom [Gor'achay linia – Telekom]. – 53 p.
  16. Sergienko A. B. (2011) Digital signal processing [Cifrovay obrabotka signalov]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg. – 768 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским  
Поступила в редакцию 26.01.2018, принята к публикации 06.09.2018*

*ЗАСОВ Валерий Анатольевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения.

e-mail: vzasov@mail.ru

© Засов В. А., 2019

УДК 656.27:656.254.4

**А. Б. Никитин, д-р техн. наук,  
И. В. Кушпиль**

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

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ СТАНЦИЯМИ НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ**

В статье изложены особенности организации цифровой радиосвязи и передачи данных между станциями на малодеятельных линиях при минимальных затратах. Показано, что технология DMR является наиболее гибкой при организации цифровой радиосвязи диапазона 160 МГц на таких полигонах. Выполнен подробный расчет дальности действия станционной и поездной радиосвязи для условий, в которых эксплуатируются эти линии. По полученным данным построены графики зависимости дальности действия радиосвязи от уровня надежности, мощности радиопередатчиков, высоты установки антенн и различных типов трассы. Описан способ передачи данных между железнодорожными станциями при использовании существующих кабелей железнодорожной связи. Полученные результаты могут быть полезны при разработке и проектировании систем управления движением поездов и систем интервального регулирования, принцип работы которых основан на передаче данных по радиоканалу.

малодеятельная линия; технология digital mobile radio; станционная цифровая радиосвязь; поездная цифровая радиосвязь; дальность действия радиосвязи; управление движением поездов

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.

### **Введение**

Проблема убыточности малодеятельных железнодорожных линий (МДЛ) широко известна во многих странах мира. В России линия имеет статус малодеятельной, если суммарный размер движения пассажирских и грузовых поездов 8 пар в сутки и менее, а приведенная грузонапряженность составляет менее 5 млн т-км брутто/км в год [1, 2]. Такие линии, как правило, не приносят доходов, но требуют финансовых вложений для поддержания работоспособного состояния. Одна из их особенностей – минимальные капитальные вложения в техническое оснащение. Как следствие, возникает необходимость в содержании неэффективно загруженного персонала, выполняющего по большей части ручную работу и рутинные операции.

Зарубежный опыт эксплуатации МДЛ показал, что наиболее перспективные решения по снижению расходов основаны на использовании цифровой радиосвязи совместно с системами спутникового позиционирования для управления движением поездов [3, 4]. Это значительно сокращает ко-

личество стационарного персонала и позволяет практически полностью отказаться от напольного оборудования систем СЦБ [5]. Особенно актуальным это может быть для линий, которые эксплуатируются в сложных климатических условиях Крайнего Севера.

## 1. Основные положения

В настоящее время на смену существующим аналоговым видам железнодорожной радиосвязи приходят цифровые. Последние обладают рядом известных преимуществ: возможность передачи данных, защита информации, возможность сопряжения с аппаратурой по стандартному интерфейсу, улучшенное качество голосовой связи и т. д. [6].

Широко известные в железнодорожной отрасли технологии цифровой радиосвязи GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) и TETRA (Terrestrial Trunked Radio) достаточно дороги в реализации, а значит, неприемлемы для МДЛ [7].

Наиболее гибким и менее затратным решением является технология DMR (Digital Mobile Radio). Работающая в диапазоне 160 МГц аппаратура DMR может использоваться для организации стационарной цифровой радиосвязи (СРС-Ц) и поездной (ПРС-Ц). Технологию DMR выгодно отличает от технологий GSM-R и TETRA низкая стоимость радиоаппаратуры, совместимость ее с аппаратурой различных производителей и возможность работы одновременно в двух режимах: аналоговом и цифровом. Это позволяет выполнить гибкий переход от аналоговых средств радиосвязи к цифровым с минимальными затратами. На первом этапе все виды существующей аналоговой радиосвязи на МДЛ сохраняются, а цифровой канал DMR лишь накладывается на них. В дальнейшем предполагается полная замена всей аналоговой аппаратуры [8].

Оборудование цифрового радиоканала на каждой станции состоит из базовой радиостанции (БС) и антенны (рис. 1) [9]. БС располагается в постовом помещении. В кабине локомотива, обращающегося на участке, устанавливается радиомодем (РМ) связанный с антенной. БС отслеживает все РМ в зоне покрытия и поддерживает с каждым постоянное соединение.

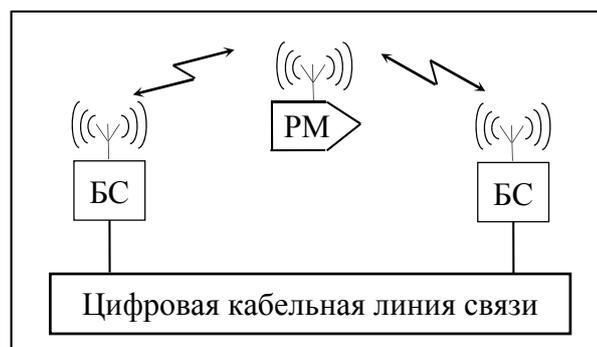


Рис. 1. Принцип организации железнодорожной цифровой радиосвязи

Для реализации радиосвязи на МДЛ необходимо выполнить расчеты с учетом условий эксплуатации. По полученным результатам можно будет сделать выводы о максимальной дальности действия радиосвязи, дать рекомендации по необходимому количеству БС и их мощности, высоте установки антенн.

В основе расчетов СРС-Ц и ПРС-Ц диапазона 160 МГц может быть использована методика, приведенная в [10, 11].

## 2. Расчет дальности действия станционной цифровой радиосвязи диапазона 160 МГц на малодейственных линиях

Для расчета введем следующие параметры:

$r$  – дальность действия радиосвязи, км;

$U_2$  – уровень полезного сигнала на входе приемника (радиомодема), дБ;

$U_{2\min}$  – уровень минимально допустимого полезного сигнала на входе приемника, дБ; зависит от рода тяги на станции, на МДЛ широко применяется тепловозная тяга ( $U_{2\min} = 4$  дБ);

$P_{\text{пер}}$  – мощность сигнала на выходе радиопередатчика, Вт;

$\alpha_1(\alpha_2)$  – затухание в коаксиальном кабеле передающей (приемной) антенны, дБ/м;

$l_1(l_2)$  – длина коаксиального кабеля передающей (приемной) антенны, м;

$h_1(h_2)$  – высота установки передающей (приемной) антенны, м;

$G_1(G_2)$  – коэффициенты усиления передающей (приемной) антенны, дБ;

$p$  – надежность радиосвязи, % (принимается 97–99 %).

Для учета местных условий, особенностей аппаратуры и явления интерференции сигналов введем в расчеты поправочные коэффициенты:

$B_{\phi}$  – коэффициент ослабления сигнала, дБ, вследствие затухания сигнала в коаксиальном кабеле передающей (приемной) антенны,  $B_{\phi} = \alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2$ ;

$B_m$  – коэффициент, учитывающий отличие  $P_{\text{пер}}$  от 12 Вт, дБ,  $B_m = 10 \lg(P_{\text{пер}}/12)$ ;

$B_l$  – коэффициент ослабления сигнала корпусом локомотива, дБ ( $B_l = 9$  дБ);

$B_n$  – коэффициент ослабления сигнала в результате интерференции, дБ; зависит от требуемой надежности связи  $p$  (при  $p = 97\%$   $B_n = -9$  дБ; при  $p = 98\%$   $B_n = -11$  дБ; при  $p = 99\%$   $B_n = -14$  дБ).

Расчет сводится к вычислению значения  $U_2$  и далее по аппроксимирующему уравнению определяется дальность действия станционной радиосвязи  $r$ :

$$U_2 = U_{2\min} + B_{\phi} - B_m + B_l - B_n - G_1 - G_2;$$

$$r = \left( 77,5 h_1 h_2 / 10 \frac{U_2 + 10}{20} \right)^{0,5}.$$

Расчет дальности действия СРС-Ц выполним для  $P_{\text{пер}} = 5, 10, 20$  Вт при трех уровнях надежности связи (97–99 %). Для каждого передатчика будут также рассмотрены два варианта установки передающей (приемной) антенны, при  $h_1 h_2 = 25 \text{ м}^2$  и  $h_1 h_2 = 50 \text{ м}^2$ . Стоит отметить, что значение  $h_2$  не будет меняться в силу того, что локомотивная антенна всегда находится на уровне 5 м.

Результаты вычислений приведены в табличной (см. табл. 1–3) и графической форме (рис. 2).

**Таблица 1.** Дальность действия СРС-Ц при  $P_{\text{пер}} = 5$  Вт

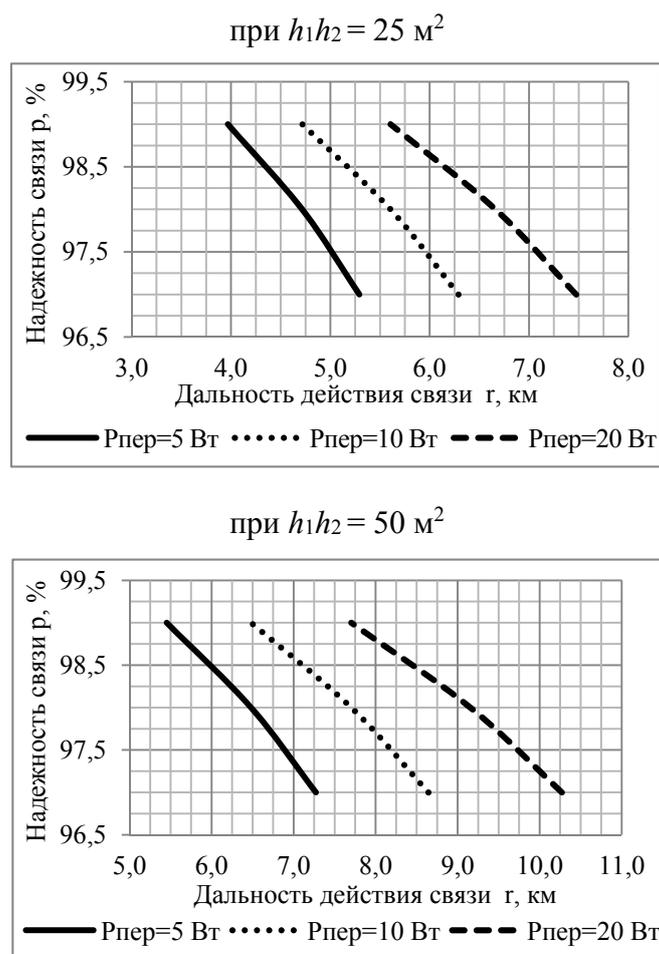
$h_1 h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{\text{пер}}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$l_1(l_2)$ , м	$G_1(G_2)$ , дБ	$p$ , %	$B_{\text{ф}}$ , дБ	$B_{\text{м}}$ , дБ	$B_{\text{л}}$ , дБ	$B_{\text{и}}$ , дБ	$U_{2\text{min}}$ , дБ	$U_2$ , дБ	$r$ , км
25	5	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	97	1	-3,8	9	-9	4	26,8	5,3
25	5	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	98	1	-3,8	9	-11	4	28,8	4,7
25	5	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	99	1	-3,8	9	-14	4	31,8	4,0
50	5	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	97	1,5	-3,8	9	-9	4	27,3	7,3
50	5	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	98	1,5	-3,8	9	-11	4	29,3	6,5
50	5	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	99	1,5	-3,8	9	-14	4	32,3	5,5

**Таблица 2.** Дальность действия СРС-Ц при  $P_{\text{пер}} = 10$  Вт

$h_1 h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{\text{пер}}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$l_1(l_2)$ , м	$G_1(G_2)$ , дБ	$p$ , %	$B_{\text{ф}}$ , дБ	$B_{\text{м}}$ , дБ	$B_{\text{л}}$ , дБ	$B_{\text{и}}$ , дБ	$U_{2\text{min}}$ , дБ	$U_2$ , дБ	$r$ , км
25	10	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	97	1	-0,8	9	-9	4	23,8	6,3
25	10	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	98	1	-0,8	9	-11	4	25,8	5,6
25	10	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	99	1	-0,8	9	-14	4	28,8	4,7
50	10	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	97	1,5	-0,8	9	-9	4	24,3	8,6
50	10	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	98	1,5	-0,8	9	-11	4	26,3	7,7
50	10	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	99	1,5	-0,8	9	-14	4	29,3	6,5

**Таблица 3.** Дальность действия СРС-Ц при  $P_{\text{пер}} = 20$  Вт

$h_1 h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{\text{пер}}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$l_1(l_2)$ , м	$G_1(G_2)$ , дБ	$p$ , %	$B_{\text{ф}}$ , дБ	$B_{\text{м}}$ , дБ	$B_{\text{л}}$ , дБ	$B_{\text{и}}$ , дБ	$U_{2\text{min}}$ , дБ	$U_2$ , дБ	$r$ , км
25	20	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	97	1	2,2	9	-9	4	20,8	7,5
25	20	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	98	1	2,2	9	-11	4	22,8	6,7
25	20	0,1 (0,1)	5 (5)	0 (0)	99	1	2,2	9	-14	4	25,8	5,6
50	20	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	97	1,5	2,2	9	-9	4	21,3	10,3
50	20	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	98	1,5	2,2	9	-11	4	23,3	9,2
50	20	0,1 (0,1)	10 (5)	0 (0)	99	1,5	2,2	9	-14	4	26,3	7,7



**Рис. 2.** Графики зависимости дальности действия СРС-Ц от уровня надежности

### 3. Расчет дальности действия поездной цифровой радиосвязи диапазона 160 МГц на малодейтельных линиях

Для расчета введем следующие параметры:

$r$  – дальность действия связи, км;

$E'$  – напряженность поля, дБ;

$U_{2\min}$  – уровень минимально допустимого полезного сигнала на входе приемника, дБ; при тепловозной тяге  $U_{2\min} = 4$  дБ;

$P_{\text{пер}}$  – мощность на выходе передатчика (базовой станции), Вт;

$B_m$  – коэффициент, учитывающий отличие мощности передатчика от мощности 1 Вт, дБ,  $B_m = 10 \lg(P_{\text{пер}}/1 \text{ Вт})$ ;

$\alpha_1(\alpha_2)$  – затухание в коаксиальном кабеле передающей (базовой станции) и приемной (локомотивной) антенны, дБ/м;

$l_1(l_2)$  – длина коаксиального кабеля передающей (приемной) антенны, м;

$h_1(h_2)$  – высота установки передающей (приемной) антенны, м;

$G_1(G_2)$  – коэффициент усиления передающей (приемной) антенны, дБ;

$p$  – надежность связи, %; принимаем 93–95 %, так как при более высоких уровнях надежности значительно снижается достоверность расчетов;

Для учета местных условий, особенностей радиоаппаратуры и явления интерференции сигналов введем также в расчеты поправочные коэффициенты:

$K_{ст}$  – коэффициент сложности трассы от 1 до 5; в большинстве районов европейской части России и Сибири встречается трасса второго типа – среднепересеченная, с колебаниями уровня не более 50 м ( $K_{ст} = 2$ ), трасса третьего типа – легкая горная ( $K_{ст} = 3$ ); дальнейшие расчеты будут производиться для этих двух типов трасс;

$\alpha_t$  – коэффициент, учитывающий особенности распространения радиоволн, дБ, в зависимости от  $K_{ст}$  (при  $K_{ст} = 2$   $\alpha_t = 0$  дБ; при  $K_{ст} = 3$   $\alpha_t = -3,4$  дБ);

$M$  – высотный коэффициент, дБ, учитывающий отличие произведения высот установки антенн  $h_1$  и  $h_2$  от  $100 \text{ м}^2$ ,  $M = 20 \lg (h_1 h_2 / 100 \text{ м}^2)$ ;

$B_\phi$  – коэффициент ослабления сигнала, дБ, вследствие затухания сигнала в коаксиальном кабеле передающей (приемной) антенны,  $B_\phi = \alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2$ ;

$K_э$  – коэффициент ослабления поля влиянием металлической крыши локомотива, дБ; зависит от типа локомотива и антенны; при тепловозной тяге на МДЛ используются локомотивы типов: М62, 2М62, ТЭМ2, 2ТЭМ116, ТЭМ18ДМ [12], для них  $K_э = 2$  дБ при установленном четвертьволновом петлевом вибраторе;

$g_2$  – коэффициент перехода от напряженности поля сигнала к напряжению в точке соединения приемной антенны с фидером, дБ; при фидере 75 Ом  $g_2 = 10$  дБ.

$K_{и}$  – коэффициент, учитывающий наличие интерференционных волн, дБ; при  $p = 93$  %  $K_{и} = 1,8$  дБ; при  $p = 94$  %  $K_{и} = 2$  дБ; при  $p = 95$  %  $K_{и} = 2,2$  дБ;

$K_в$  – колебания напряженности поля (суточные и сезонные) за счет изменения рефракции в тропосфере, дБ; при  $p = 93$  %  $K_в = 2,5$  дБ; при  $p = 94$  %  $K_в = 2,8$  дБ; при  $p = 95$  %  $K_в = 3,1$  дБ;

$K_м$  – медленные колебания напряженности поля вследствие изменения рельефа местности, дБ; для типа трассы  $K_{ст} = 2$ : при  $p = 93$  %  $K_м = 4,8$  дБ; при  $p = 94$  %  $K_м = 5$  дБ; при  $p = 95$  %  $K_м = 5,3$  дБ; для типа трассы  $K_{ст} = 3$ : при  $p = 93$  %  $K_м = 6$  дБ; при  $p = 94$  %  $K_м = 6,4$  дБ; при  $p = 95$  %  $K_м = 6,7$  дБ;

$K_{кс}$  – коэффициент ослабления напряженности поля контактной сетью, дБ; при тепловозной тяге  $K_{кс} = 0$  дБ.

Расчет сводится к вычислению  $E'$  и далее по аппроксимирующим уравнениям рассчитывается дальность действия радиосвязи  $r$  для худших условий, когда направления связи и трассы железнодорожной линии не совпадают:

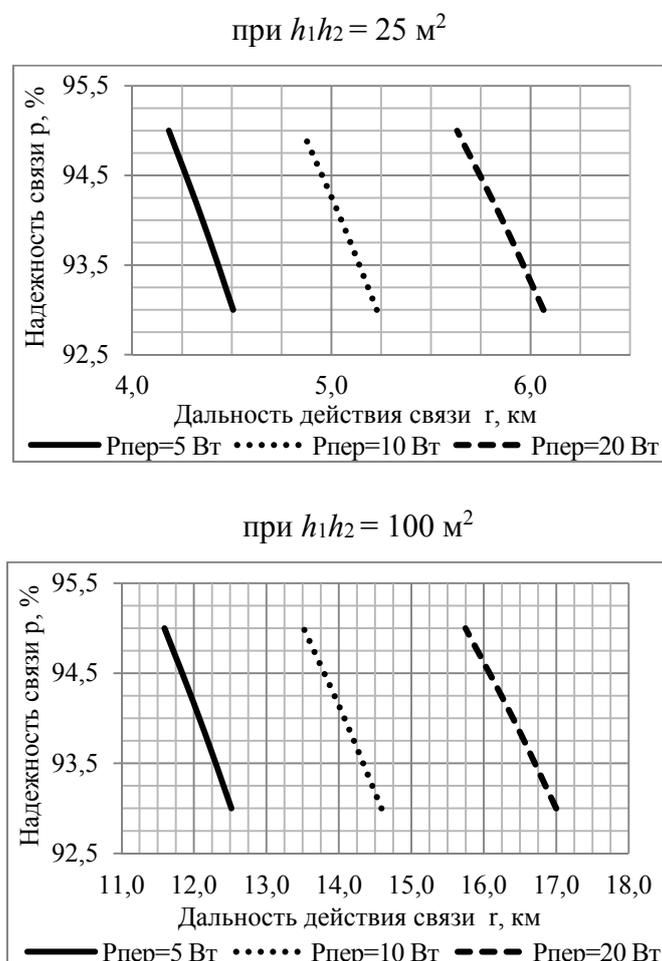
$$E' = U_{2\min} - \alpha_T - B_M - G_1 - G_2 - M + B_\Phi + K_3 + g_2 + K_{\text{и}} + K_{\text{в}} + K_{\text{м}} + K_{\text{КС}};$$

$$r = 10 \exp[-(E' - 15)/20,2] \quad (\text{при } h_1 h_2 = 25 \text{ м}^2);$$

$$r = 10 \exp[-(E' - 25)/19,6] \quad (\text{при } h_1 h_2 = 100 \text{ м}^2).$$

Расчет дальности ПРС-Ц выполним для  $P_{\text{пер}} = 5, 10, 20$  Вт при трех уровнях надежности связи ( $p = 93, 94, 95$  %), для двух типов трасс ( $K_{\text{ст}} = 2; 3$ ). Также будут рассмотрены два варианта установки передающей (приемной) антенны, при  $h_1 h_2 = 25 \text{ м}^2$  и при  $h_1 h_2 = 100 \text{ м}^2$ . Стоит отметить, что значение  $h_2$  не будет меняться в силу того, что локомотивная антенна всегда устанавливается на уровне 5 м.

Результаты вычислений приведены графической форме (рис. 3, 4) и в табличной (см. табл. 4–9).



**Рис. 3.** Графики зависимости дальности действия ПРС-Ц от уровня надежности на среднепересеченной местности ( $K_{\text{ст}} = 2$ )

Тип трассы: среднепересеченная ( $K_{ст} = 2$ ):

Таблица 4. Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 5$  Вт

$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$p$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_{г1}$ , дБ	$B_{м1}$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M_1$ , дБ	$B_{ф1}$ , дБ	$K_{с1}$ , дБ	$g_{21}$ , дБ	$K_{м1}$ , дБ	$K_{в1}$ , дБ	$K_{кс1}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	5	0,1(0,1)	5(5)	93	4	0	7	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	4,8	0	31,1	4,5
25	5	0,1(0,1)	5(5)	94	4	0	7	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	5	0	31,8	4,4
25	5	0,1(0,1)	5(5)	95	4	0	7	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	5,3	0	32,6	4,2
100	5	0,1(0,1)	20(5)	93	4	0	7	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	4,8	0	20,6	12,5
100	5	0,1(0,1)	20(5)	94	4	0	7	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	5	0	21,3	12,1
100	5	0,1(0,1)	20(5)	95	4	0	7	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	5,3	0	22,1	11,6

Таблица 5. Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 10$  Вт

$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$p$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_{г1}$ , дБ	$B_{м1}$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M_1$ , дБ	$B_{ф1}$ , дБ	$K_{с1}$ , дБ	$g_{21}$ , дБ	$K_{м1}$ , дБ	$K_{в1}$ , дБ	$K_{кс1}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	10	0,1(0,1)	5(5)	93	4	0	10	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	4,8	0	28,1	5,2
25	10	0,1(0,1)	5(5)	94	4	0	10	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	5	0	28,8	5,1
25	10	0,1(0,1)	5(5)	95	4	0	10	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	5,3	0	29,6	4,9
100	10	0,1(0,1)	20(5)	93	4	0	10	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	4,8	0	17,6	14,6
100	10	0,1(0,1)	20(5)	94	4	0	10	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	5	0	18,3	14,1
100	10	0,1(0,1)	20(5)	95	4	0	10	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	5,3	0	19,1	13,5

Таблица 6. Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 20$  Вт

$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$p$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_{г1}$ , дБ	$B_{м1}$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M_1$ , дБ	$B_{ф1}$ , дБ	$K_{с1}$ , дБ	$g_{21}$ , дБ	$K_{м1}$ , дБ	$K_{в1}$ , дБ	$K_{кс1}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	20	0,1(0,1)	5(5)	93	4	0	13	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	4,8	0	25,1	6,1
25	20	0,1(0,1)	5(5)	94	4	0	13	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	5	0	25,8	5,9
25	20	0,1(0,1)	5(5)	95	4	0	13	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	5,3	0	26,6	5,6
100	20	0,1(0,1)	20(5)	93	4	0	13	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	4,8	0	14,6	17,0
100	20	0,1(0,1)	20(5)	94	4	0	13	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	5	0	15,3	16,4
100	20	0,1(0,1)	20(5)	95	4	0	13	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	5,3	0	16,1	15,7

**Тип трассы: легкая горная ( $K_{ст} = 3$ ):**

**Таблица 7.** Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 5$  Вт

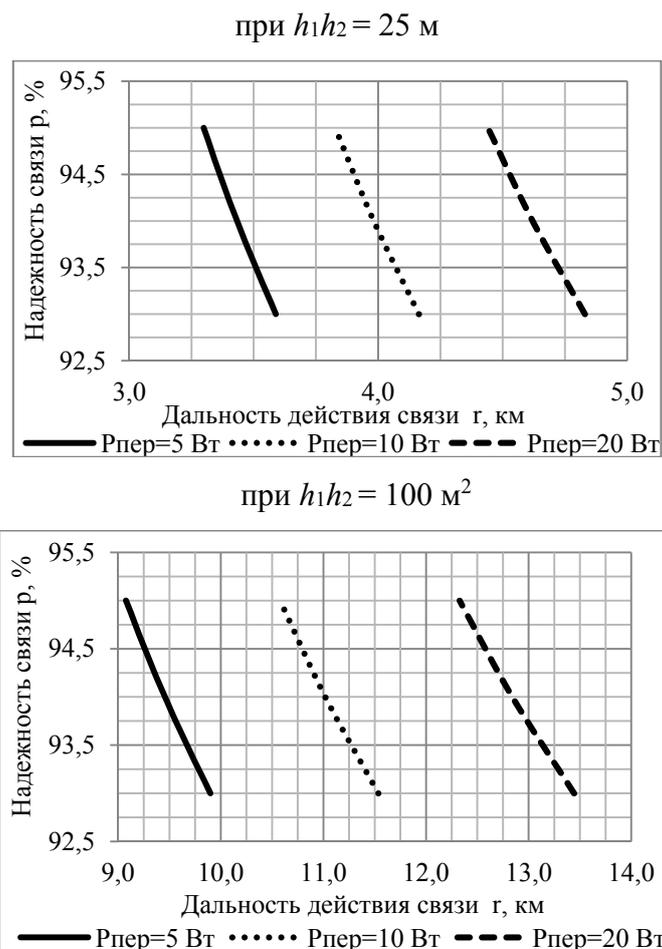
$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$\rho$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_r$ , дБ	$V_M$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M$ , дБ	$B_{ф}$ , дБ	$K_3$ , дБ	$g_2$ , дБ	$K_{н}$ , дБ	$K_{в}$ , дБ	$K_{кс}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	5	0,1(0,1)	5(5)	93	4	-3,4	7	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	6	0	35,7	3,6
25	5	0,1(0,1)	5(5)	94	4	-3,4	7	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	6,4	0	36,6	3,4
25	5	0,1(0,1)	5(5)	95	4	-3,4	7	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	6,7	0	37,4	3,3
100	5	0,1(0,1)	20(5)	93	4	-3,4	7	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	6	0	25,2	9,9
100	5	0,1(0,1)	20(5)	94	4	-3,4	7	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	6,4	0	26,1	9,5
100	5	0,1(0,1)	20(5)	95	4	-3,4	7	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	6,7	0	26,9	9,1

**Таблица 8.** Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 10$  Вт

$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$\rho$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_r$ , дБ	$V_M$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M$ , дБ	$B_{ф}$ , дБ	$K_3$ , дБ	$g_2$ , дБ	$K_{н}$ , дБ	$K_{в}$ , дБ	$K_{кс}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	10	0,1(0,1)	5(5)	93	4	-3,4	10	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	6	0	32,7	4,2
25	10	0,1(0,1)	5(5)	94	4	-3,4	10	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	6,4	0	33,6	4,0
25	10	0,1(0,1)	5(5)	95	4	-3,4	10	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	6,7	0	34,4	3,8
100	10	0,1(0,1)	20(5)	93	4	-3,4	10	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	6	0	22,2	11,5
100	10	0,1(0,1)	20(5)	94	4	-3,4	10	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	6,4	0	23,1	11,0
100	10	0,1(0,1)	20(5)	95	4	-3,4	10	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	6,7	0	23,9	10,6

**Таблица 9.** Дальность действия ПРС-Ц при  $P_{пер} = 20$  Вт

$h_1/h_2$ , м <sup>2</sup>	$P_{пер}$ , Вт	$\alpha_1(\alpha_2)$ , дБ/м	$I_1(I_2)$ , м	$\rho$ , %	$U_{2min}$ , дБ	$\alpha_r$ , дБ	$V_M$ , дБ	$G_1(G_2)$ , дБ	$M$ , дБ	$B_{ф}$ , дБ	$K_3$ , дБ	$g_2$ , дБ	$K_{н}$ , дБ	$K_{в}$ , дБ	$K_{кс}$ , дБ	$E'$ , дБ	$r$ , км	
25	20	0,1(0,1)	5(5)	93	4	-3,4	13	0(0)	-12	1	2	10	1,8	2,5	6	0	29,7	4,8
25	20	0,1(0,1)	5(5)	94	4	-3,4	13	0(0)	-12	1	2	10	2	2,8	6,4	0	30,6	4,6
25	20	0,1(0,1)	5(5)	95	4	-3,4	13	0(0)	-12	1	2	10	2,2	3,1	6,7	0	31,4	4,4
100	20	0,1(0,1)	20(5)	93	4	-3,4	13	0(0)	0	2,5	2	10	1,8	2,5	6	0	19,2	13,4
100	20	0,1(0,1)	20(5)	94	4	-3,4	13	0(0)	0	2,5	2	10	2	2,8	6,4	0	20,1	12,8
100	20	0,1(0,1)	20(5)	95	4	-3,4	13	0(0)	0	2,5	2	10	2,2	3,1	6,7	0	20,9	12,3



**Рис. 4.** Графики зависимости дальности действия ПРС-Ц от уровня надежности на легкой горной местности ( $K_{ст} = 3$ )

#### 4. Передача данных между станциями на малодеятельных линиях

Очевидно, что подключение аппаратуры цифровой радиосвязи напрямую к существующим аналоговым межстанционным линиям отделенческой связи не представляется возможным. Поэтому необходимо рассмотреть возможность передачи данных между станциями при минимально возможных затратах.

Одним из вариантов коммуникации может служить передача информации через общедоступные сети (Intranet, местные телефонные линии связи, аренда линий передачи данных близлежащих предприятий). В результате этого могут быть снижены затраты, но наличие таких сетей не всегда гарантировано местными условиями [13].

Другим решением является прокладка волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) между станциями, что, с одной стороны, гарантированно обеспечит передачу данных, а с другой, потребует значительных капиталовложений в инфраструктуру. Так, средняя стоимость прокладки 1 км ВОЛП вдоль пути с учетом стоимости кабеля находится в пределах 300–400 тыс. руб. в текущих ценах [14]. С учетом расстояний между станциями (5–15 км),

протяженности малодеятельных линий (20–120 км) и стоимости аппаратуры (мультиплексоры, регенераторы) суммарные затраты окажутся значительными. Поэтому данное решение также не является приемлемым.

Особый интерес представляет технология SHDSL (Single-pair High-speed Digital Subscriber Line), обеспечивающая передачу данных по существующим симметричным медным кабелям связи со скоростью до 12 Мбит/с, при этом отсутствует необходимость в прокладке новых линий связи.

Железнодорожные кабели связи представлены тремя группами.

1. Низкочастотные кабели местной связи – для связи станции с местными телефонными станциями, связь со стрелочными постами. Типы используемых кабелей: Т, ТПП, КСП с диаметром жил 0,4–0,9 мм.

2. Низкочастотные кабели дальней связи – для организации всех видов отделенческой связи. Типы используемых кабелей: ТЗ, ТЗП, ТЗА, ТЗС, ЗКП с диаметром жил 0,8–1,2 мм.

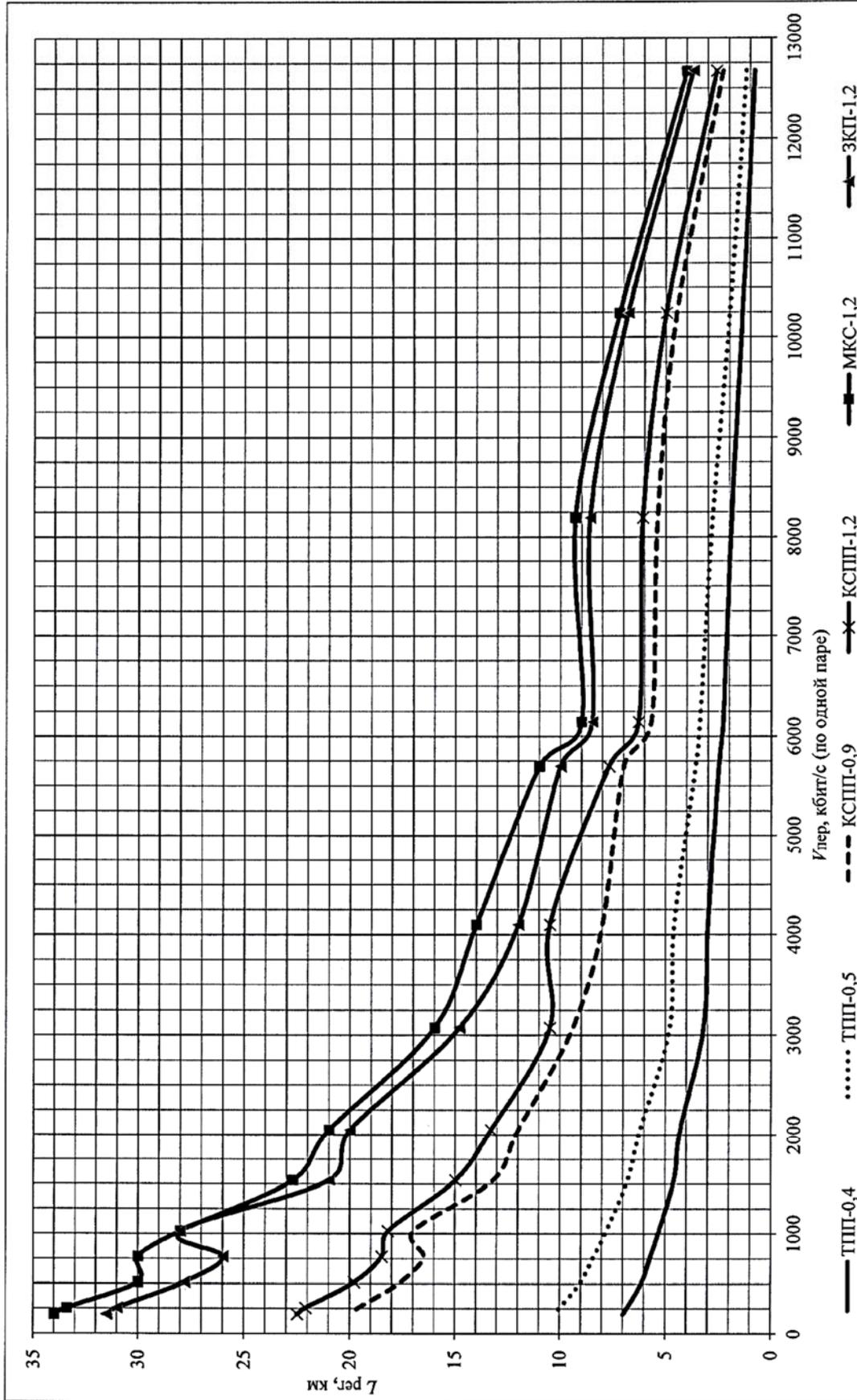
3. Высокочастотные кабели дальней связи (магистральные) – для организации магистральной, дорожной и отделенческой связи. Типы используемых кабелей: МКП, МКС, МКБ с диаметром жил 0,7–1,2 мм [15].

Передача данных осуществляется при помощи SHDSL-модемов, устанавливаемых по одному на каждой станции участка. Модем подключается к паре ненагруженных симметричных медных жил. В зависимости от конфигурации модем может иметь выходной Ethernet-порт или интерфейсный разъем RS-232.

Скорость передачи данных ( $V_{\text{пер}}$ ) определяется исходя из потребностей системы управления, необходимой длины регенерационного участка ( $L_{\text{рег}}$ ), типа кабеля и его состояния [16, 17] (табл. 10, рис. 5). Особо стоит отметить низкую стоимость таких модемов (80–120 тыс. руб./шт. в текущих ценах).

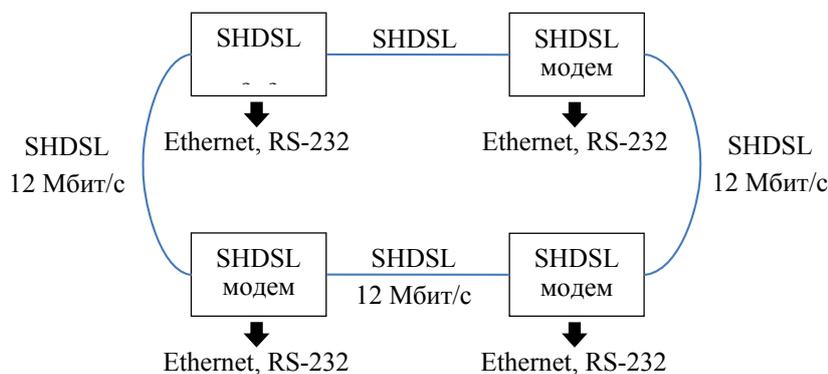
**Таблица 10.** Длина регенерационного участка SHDSL-линии

$V_{\text{пер}}$ , Кбит/с (по одной паре)	$L_{\text{рег}}$ , км, при использовании кабеля типа:					
	ТПП-0,4	ТПП-0,5	КСПП-0,9	КСПП-1,2	ЗКП-1,2	МКС-1,2
12672	0,8	1,2	2,3	2,6	3,7	4
10240	1,4	2	4,5	5	6,8	7,2
8192	1,9	2,8	5,4	6,1	8,6	9,3
6144	2,3	3,4	5,7	6,3	8,5	9
5696	2,5	3,6	7	7,7	10	11
4096	3	4,6	8	10,5	12	14
3072	3,2	4,8	9,4	10,5	14,8	16
2048	4,3	6,2	12	13,3	20	21
1536	4,6	6,8	13,2	15	21	22,7
1024	5,3	7,8	17	18,2	28	28
768	5,7	8,4	16,5	18,5	26	30
512	6,1	9	17,6	19,8	27,8	30
256	6,8	10	19,6	22,1	31	33,4
192	7	10,2	20	22,5	31,5	34



**Рис. 5.** График зависимости длины регенерационного участка от скорости передачи данных для разных типов симметричных кабелей

Специализированные модемы позволяют строить все виды топологий сетей передачи данных. С точки зрения надежности и живучести на МДЛ предпочтительной является кольцевая топология (рис. 6). Благодаря специальному протоколу резервирования, в случае обрыва линии или отказа одного из модемов, переключение на обходной резервный канал произойдет автоматически.



**Рис. 6.** Кольцевая топология сети передачи данных построенной на SHDSL-модемах

## Заключение

Исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. При организации цифровой радиосвязи на МДЛ следует отдавать предпочтение технологии DMR вместо GSM-R или TETRA, так как она позволяет при минимуме затрат выполнить переход от аналоговых средств связи к цифровым.

2. На МДЛ сложились благоприятные условия для организации цифровой радиосвязи благодаря отсутствию контактной сети на станциях и перегонах.

3. Для организации СРС-Ц достаточно одного радиопередатчика мощностью 5 Вт при высоте установки передающей антенны на уровне 5 м. При этом обеспечивается дальность действия, равная 4 км, при уровне надежности связи 99 %. Этого вполне достаточно, поскольку протяженность отдельных пунктов в пределах МДЛ редко бывает более 2–3 км. При необходимости дальность действия радиосвязи можно увеличить за счет снижения уровня надежности.

4. Для организации ПРС-Ц необходимо увеличивать мощность передатчика, высоту установки передающей антенны или одновременно оба эти параметра. Следует также учитывать тип трассы участка и длину перегонов. Кроме того, вследствие возможной сложности рельефа местности, для повышения надежности ПРС-Ц желательно использовать радиоаппаратуру,

поддерживающую несколько диапазонов одновременно, например 160, 330, 450 МГц.

5. Полученные графики зависимости (см. рис. 2–5) могут использоваться при разработке и проектировании систем управления движением поездов и систем интервального регулирования, основанных на передачи данных.

6. При организации передачи данных между станциями наименее затратным решением является применение SHDSL-модемов, которые делают возможной передачу данных на скорости до 12 Мбит/с по существующим медным симметричным кабелям отделенческой связи.

### Библиографический список

1. Об утверждении методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД». Распоряжение № 3048р. – М., 2015.
2. Об утверждении результатов классификации железнодорожных линий. Распоряжение № 3188р. – М., 2015.
3. Никитин А. Б. Упрощенные принципы управления движения поездов на малодеятельных линиях железных дорог мира / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы-2017». – СПб., 2017. – С. 181–188.
4. Ран В. Х. Спутниковая навигация и управление движением поездов на малодеятельных линиях / В. Х. Ран // Железные дороги мира. – 1999. – № 2. – С. 13–17.
5. Никитин А. Б. Новый порядок организации движения поездов на малодеятельных линиях ОАО «РЖД» / А. Б. Никитин, И. М. Кокурин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 4. – С. 15.
6. Горелов Г. В. Радиосвязь с подвижными объектами железнодорожного транспорта / Г. В. Горелов, Ю. И. Таныгин. – М. : Маршрут, 2006. – 263 с.
7. Гайстер А. ETCS уровня 2 с альтернативными системами радиосвязи / А. Гайстер, М. Шваб // Железные дороги мира. – 2013. – № 10. – С. 57–63.
8. Распоряжение об утверждении обобщенного частотного плана ОАО «РЖД» в диапазоне 160 МГц № 340р от 11.02.2013. – [М., 2013].
9. НТП-ЦТКС-ФЗТ–2002. Нормы технологического проектирования цифровых телекоммуникационных сетей на федеральном железнодорожном транспорте. – М. : Трансиздат, 2002.
10. Горелов Г. В. Системы связи с подвижными объектами / Г. В. Горелов, Д. Н. Роенков, Ю. В. Юркин. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 335 с.
11. Методические указания по организации и расчету сетей поездной радиосвязи ОАО «РЖД» № 2854 от 23.12.2013. – [М., 2013].
12. Паспорта малодеятельных железнодорожных линий Октябрьской железной дороги ОАО «РЖД». – М., 2017.
13. Рисбек Т. Передача данных по технологии DSL в МПЦ ESTW L90 / Т. Рисбек, К. Айсерманн // Железные дороги мира. – 2010. – № 11. – С. 58–60.
14. Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве // Железные дороги. – 2014. – № 590.

15. Виноградов В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Виноградов, С. Е. Кустышев, В. А. Прокофьев. – М. : Маршрут, 2002.
16. Балашов В. А. Технологии широкополосного доступа xDSL. Инженерно-технический справочник / В. А. Балашов, А. Г. Лашко, Л. М. Ляховецкий. – М. : Эко-Трендз, 2009. – 256 с.
17. Зелакс М-1. Руководство пользователя М-1-МЕГА. – Редакция 06 от 27.10.2015 ПО 02.02.0036. – [М., 2015].

*Alexander B. Nikitin,*

*Igor V. Kushpil,*

«Automation and remote control on railways» department  
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

### **Investigation of the possibility of introduction of digital radio communications and organization of data transfer between stations at low-density lines**

The article describes the main provisions of the organization of digital radio communication and data transmission between stations on low-density railway lines with minimal costs. It is shown that DMR technology is the most flexible in the organization of digital radio communications of the 160 MHz band on the polygon of low-density lines. A detailed calculation of the range of station and train radio communication for the conditions in which these lines are operated is performed. According to the received data, the dependencies of the radio communication range on the level of reliability, the power of the radio transmitters, the height of the antenna installation and various types of the route are plotted. A method for data transmission between railway stations is described, using existing railway communication cables. The results obtained can be useful in the development and design of train control systems and interval control systems, the operation principle of which is based on radio data transmission.

low-density railway line; regional line; secondary line; technology (digital mobile radio); station digital radio communication; train digital radio communication; radio communication range; train traffic control

### **References**

1. On approval of the methodology for the classification and specialization of railway lines of JSC Russian Railways [Rasporyazheniye N 3048r Ob utverzhdenii metodiki klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy OAO RZHD]. Moscow, 2015.
2. On the approval of the results of the classification of railway lines. Ordinance N 3188r [Ob utverzhdenii rezul'tatov klassifikatsii zheleznodorozhnykh liniy. Rasporyazheniye N 3188r]. Moscow, 2015.
3. Nikitin A. B., Kushpil I. V. (2017). Simplified principles of train traffic management on the low-density lines of the world railways. Collection of materials of the First International Scientific and Practical Conference «Transport» Intelligent Systems-2017» [Uproshchennyye printsipy upravleniya dvizheniya poyezdov na malodeyatel'nykh liniyakh zheleznikh dorog mira]. St. Petersburg. – Pp. 181–188.

4. Rahn W. H. (1999). Satellite navigation and control of the movement of trains on low-activity lines. *Railways of the World*, N 2.
5. Nikitin A. B., Kokurin I. M., Kushpil I. V. (2018). Novyy poryadok organizatsii dvizheniya poyezdov na malodeyatel'nykh liniyakh OAO «RZHD». New method of trains movement for low-density railway lines of JSC Russian Railways. *Automation in Transport [Avtomatika na transporte]*, N 4. – P. 15.
6. Gorelov G. V., Tanygin Yu. I. (2006). Radio communication with mobile objects of a railway transportation [Radiosvyaz' s podvizhnymi ob'yektami zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Marshrut.
7. Geistler A., Schwab M. (2013). ETCS level 2 with alternative radio systems. *Railways of the World*, N 10. – Pp. 57–63.
8. Order on approval of the generalized frequency plan of JSCo «Russian Railways» in the range 160 MHz N 340r as of 11.02.2013 [Rasporyazheniye ob utverzhenii obobshchennogo chastotnogo plana OAO «RZHD» v diapazone 160 MGts № 340r ot 11.02.2013].
9. NTP-CTC-FZHT–2002. Norms of technological design of digital telecommunication networks on the federal railway transport [NTP-TSTKS-FZHT-2002. Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya tsifrovyykh telekommunikatsionnykh setey na federal'nom zheleznodorozhnom transporte]. Moscow, Transizdat.
10. Gorelov G. V., Roenkov D. N., Yurkin Yu. V. (2014). Communication systems with mobile objects [Sistemy svyazi s podvizhnymi ob'yektami]. The Educational-methodical center on formation on a railway transportation [FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»]. Moscow. – 335 p.
11. Methodical instructions for organizing and calculating train radio communication networks of JSCo Russian Railways N 2854 of December 23, 2013, Moscow [Metodicheskiye ukazaniya po organizatsii i raschetu setey poyezdnoy radiosvyazi OAO «RZHD» № 2854 ot 23.12.2013. Moscva].
12. Passports of inactive railway lines of the October Railway of JSC «RZD» [Pasporta malodeyatel'nykh zheleznodorozhnykh liniy Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi OAO «RZHD»], 2017, Moscow.
13. Riesbeck T., Eisermann K. (2011). Transmission of DSL data to the MPC ESTW L90. *Railways of the world [Peredacha danny'kh po tekhnologii DSL v MPTC ESTW L90]. Zhelezny'e dorogi mira*, N 11. – Pp. 58–60
14. Reference book of basic prices for design works in construction. Railways [Spravochnik bazovykh tsen na proyektnyye raboty v stroitel'stve Zheleznyye dorogi N 590. Moscow, 2014.
15. Vinogradov V. V., Kustyshev S. E., Prokofiev V. A. (2002). Line of railway automation, telemechanics and communications. *Linii zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi*. Moscow, Marshrut.
16. Balashov V. A., Lashko A. G., Lyakhovetsky L. M. (2009). Broadband access technologies xDSL. Engineering and technical reference book. *Tekhnologii shirokopolosnogo dostupa xDSL. Inzhenerno-tekhnicheskii spravochnik*. Moscow, Eko-Trendz. – 256 p.
17. Zelax M-1. User's manual of M-1-MEGA edition 06 of October 27, 2015 to 02.02.0036 [Zelaks M-1. Rukovodstvo pol'zovatelya M-1-MEGA, redaktsiya 06 ot 27.10.2015 PO 02.02.0036], Moscow.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко  
Поступила в редакцию 22.02.2018, принята к публикации 11.09.2018*

*НИКИТИН Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: [nikitin@crtc.spb.ru](mailto:nikitin@crtc.spb.ru)

*КУШПИЛЬ Игорь Васильевич* – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: [i\\_kushpil@mail.ru](mailto:i_kushpil@mail.ru)

© Никитин А. Б., Кушпиль И. В., 2019

УДК 621.331.001.2+656:25

М. А. Гордон

Институт «Гипротрансигналсвязь» – филиал АО «Росжелдорпроект»

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ Поездов НА СТАНЦИЯХ СТЫКОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Рассмотрены история развития электрификации железных дорог в нашей стране и мировой опыт. Описаны различные системы электрификации железных дорог как по роду тока и напряжению, так и по виду контактной сети. Выполнено сравнение системы электрификации постоянным током с системой на переменном токе. Представлен международный опыт проблемы стыкования поездов на границах участков железных дорог с разным родом электрической тяги. Описаны существующие подходы к построению систем управления движением поездов в местах стыкования различных родов тягового тока, технология работы станций стыкования в нашей стране. Объяснена структура контактной сети на станции стыкования. Представлены принципы взаимодействия систем сигнализации и централизации на станции стыкования с устройствами контактной сети. Показаны элементы управления переключающихся секций контактной сети. Приведен список существующих станций стыкования в нашей стране. Дана отрицательная оценка станциям стыкования в условиях транзитного движения поездов. Рассмотрена история развития двухсистемного электроподвижного состава у нас в стране. Предложен метод организации безостановочного движения двухсистемного электроподвижного состава на полигонах с разными видами тяги. Представлены необходимые изменения в обустройстве контактной сети и алгоритмов работы станций стыкования. Описана новая сигнализация на станциях стыкования для двухсистемных поездов, введенная Руководящими указаниями по применению светофорной сигнализации в ОАО «РЖД» РУ-55–2012, обеспечивающая организацию смены рода тока двухсистемными поездами и исключение выхода поездов с односистемной тягой на маршруты для двухсистемных поездов. Рассмотрены действия дежурного по станции и машинистов при пропуске и приеме двухсистемных поездов на станциях стыкования. Данные решения уже осуществлены на станциях Владимир Горьковской ж. д., Вязьма Московской ж. д., Горячий Ключ Северо-Кавказской ж. д., Рязань-2 Московской ж. д.

станции стыкования; электрификация железных дорог; системы управления движением поездов, секционные изоляторы контактной сети; переключатели контактной сети; двухсистемные поезда; безостановочный пропуск двухсистемных поездов

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-62-77.

### Введение

Впервые возможность применения на железных дорогах электрической тяги предложил в 1874 г. российский ученый Ф. А. Пироцкий. После этого электрификацией железных дорог начали заниматься во всем мире [1–2]. В связи с тем что электрификацией занимались одновременно многие страны, системы электрификации получились различные как по роду тока и напряжению, так и по виду контактной сети. По виду контактной сети самой распространенной является система с воздушной контактной

сеть. Применяется также система с третьим контактным рельсом (в метрополитенах и на линиях трамваях во многих странах) и даже с четвертым контактным рельсом (например, в метрополитенах Лондона, Милана и на нескольких линиях метрополитена Парижа) [3–4].

По роду тока применяются три различные системы электрической тяги – постоянного тока, переменного тока пониженной частоты ( $16\frac{2}{3}$  Гц – в Германии, Австрии, Швейцарии, Швеции, Норвегии; 25 Гц – на некоторых линиях в США) и переменного тока стандартной промышленной частоты 50 Гц. В некоторых странах использовалась система с трехфазным питанием. В настоящее время такие системы применяются только на зубчатых железных дорогах Корковаду в Рио-де-Жанейро, Юнгфрау, Горнерграт в Альпах Швейцарии, Ля Пети трен де ля Рю во Франции и у судового лифта на Красноярском водохранилище в России [5–6].

По напряжению в настоящее время стандартными стали системы 600 В, 750 В, 1500 В, 3000 В постоянного тока, 15 кВ переменного тока частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц, 25 кВ переменного тока частоты 50 Гц. В некоторых странах применяется еще и система 25 кВ переменного тока частоты 60 Гц, где нормальной частотой сети является 60 Гц (США, Канада, Япония, Мексика и др.) [7–9].

В нашей стране (на тот момент СССР) первые железные дороги с электрической тягой появились в 1926 г. на маршруте Сурахан – Сабунчи – Баку. Через три года для пригородного движения был электрифицирован маршрут из Москвы-Пассажирской до Мытищ [10].

Первые электрифицированные участки в СССР были выполнены в системе постоянного тока напряжением 1,5 кВ. Позже в СССР перешли на систему постоянного тока напряжением 3 кВ [11–12].

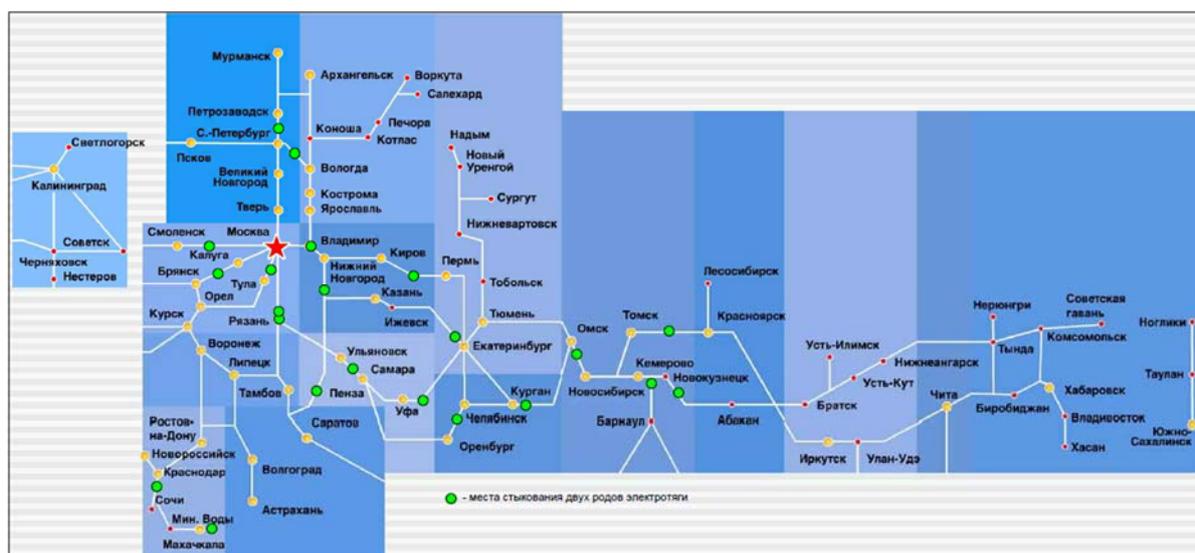
Достоинством системы постоянного тока в то время была возможность применения коллекторных двигателей постоянного тока, обладающих превосходными тяговыми и эксплуатационными свойствами. К числу ее недостатков относится сравнительно низкое значение напряжения в контактной сети, ограниченное допустимым значением напряжения двигателей. По этой причине поконтактным проводам передаются значительные токи, вызывая потери энергии и затрудняя процесс токосъема в контакте между проводом и токоприемником. Интенсификация железнодорожных перевозок, увеличение массы поездов привели на некоторых участках постоянного тока к трудностям питания электровозов из-за необходимости увеличения площади поперечного сечения проводов контактной сети (подвешивание второго усиливающего контактного провода) и обеспечения эффективности токосъема.

С начала 1950-х гг. в мире, в том числе в нашей стране, стали проводиться исследования, связанные с электрификацией железных дорог переменным током.

В СССР электрификация железных дорог переменным током стала выполняться по системе однофазного тока промышленной частоты напряжением 20 кВ, позже, после испытаний, напряжение решили увеличить до 25 кВ. Первым таким участком стал участок Ожерелье – Михайлов – Павелец, пущенный в 1955–1956 гг. [13].

На границах стыкования двух различных систем тягового тока используют либо многосистемный электроподвижной состав, либо специальные станции, на которых напряжение в контактной сети переключается.

При наличии на железнодорожной станции стыкования двух родов электротяги необходимо иметь возможность устанавливать по одним и тем же стрелкам поездные и маневровые маршруты для электротяги переменного тока или для электротяги постоянного тока, т. е. в контактную сеть, в зависимости от установленного маршрута, должен быть подан постоянный или переменный ток. Для выполнения этого условия в нашей стране в конце 1950-х гг. институтом «Гипротрансигналсвязь» были разработаны специальные технические решения. Такие станции получили названия станций стыкования. Одними из первых станций стыкования стали станции Зима и Мариинск Восточно-Сибирской ж. д. Карта мест стыкования двух родов электротяги на железных дорогах России представлена на рис. 1. [14].

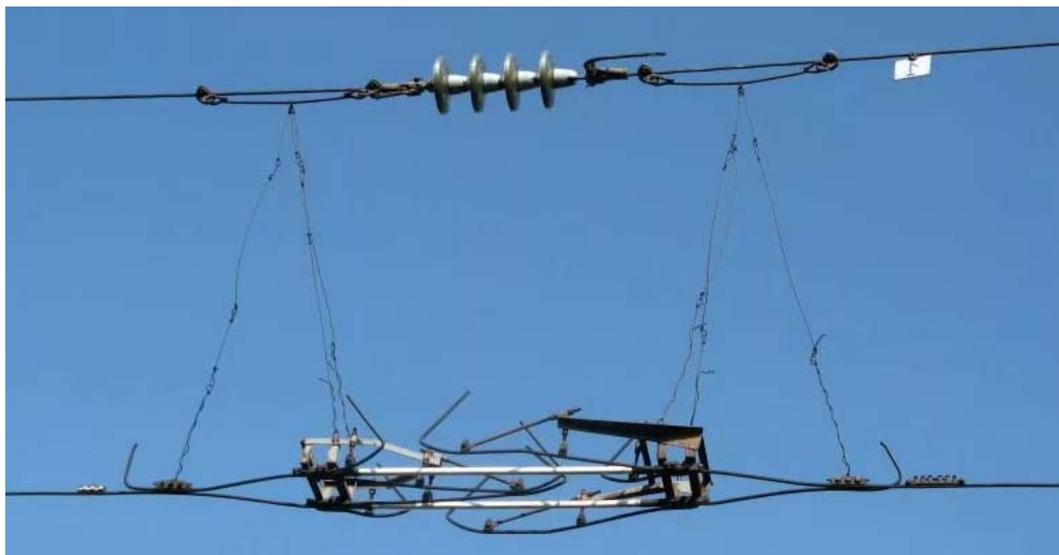


**Рис. 1.** Карта мест стыкования двух родов электротяги на железных дорогах России

За рубежом широко применяются многосистемные электропоезда, хотя в некоторых странах используют станции стыкования, на которых при движении двухсистемного поезда участок контактной сети переключается с одной системы тягового тока на другой, либо участок контактной сети при движении поезда просто отключается и поезд проезжает данный участок на выбеге [15–18].

## 1. Устройство контактной сети станций стыкования и работы устройств автоматики

Контактная сеть на станции стыкования при помощи секционных изоляторов делится на ряд изолированных друг от друга участков, называемых секциями контактной сети. Внешний вид секционного изолятора представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Секционный изолятор контактной сети

Все секции контактной сети разделяются на три группы:

1. Секции, в которые может быть подан только постоянный тяговый ток.
2. Секции, в которые может быть подан только переменный тяговый ток.
3. Секции, в которые может быть подан или постоянный или переменный тяговый ток в зависимости от установленного маршрута (переключаемые секции контактной сети).

Разбивка контактной сети на переключаемые секции производится в соответствии с путевым развитием станции и принятой маршрутизацией, с учетом параллельных передвижений по стрелкам.

Все переключаемые секции контактной сети имеют секционные переключатели, с помощью которых осуществляется их подключение или к общему фидеру постоянного тягового тока, или к общему фидеру переменного тягового тока. Внешний вид секционного переключателя типа ППС-В-3,3/27,5 показан на рис. 3 [19].

Конструктивно каждый секционный переключатель устанавливается в ячейку переключателя пункта группировки, которая предназначена для

подключения переключателя к шинам постоянного 3,3 кВ и переменного 27,5 кВ тока и отвода в контактную сеть, а также для подключения цепей управления переключателем. Внешний вид современной ячейки переключателя типа 1С-ПВ-3,3/27,5 показан на рис. 4 [19].



Рис. 3. Переключатель ППС-В-3,3/27,5



Рис. 4. Ячейка переключателя пункта группировки 1С-ПВ-3,3/27,5

Секции контактной сети, включаемые на один определенный род тягового тока, переключателей не имеют.

Для размещения приборов управления контактной сетью на станциях стыкования предусматриваются специальные пункты группировки. Внешний вид современного пункта группировки модульного типа ПГ-М-3,3/27,5 показан на рис. 5 [19].

Расстановка светофоров на станции производится согласовано с расположением секционных изоляторов в сменяемых секциях контактной сети с обязательным выделением не менее двух изолированных участков между путем с переключаемой контактной сетью и маневровым светофорах для надежной фиксации проследования локомотива.

Безостановочный пропуск поезда с автономной тягой предусматривается по путям без смены локомотива в маршрутах приема и отправления поездов.

Для указания электрической тяги устанавливаются маршрутные указатели на входных светофорах с электрифицированных перегонов, а также на маршрутных, выходных и маневровых светофорах, ограждающих въезд в район станции, оборудованной электрической централизацией, из района с электрифицированными путями, где не ведется контроль рода локомотива.



**Рис. 5.** Пункт группировки модульного типа ПГ-М-3,3/27,5

В электрическую централизацию, кроме стрелок и сигналов, входят переключатели секций контактной сети, участвующие в поездных и маневровых маршрутах. Управление переключателями и стрелками осуществляется по однотипным схемам.

Электрическая централизация дополняется следующими зависимостями:

1. Переключение секций контактной сети осуществляется при установке маршрутов автоматически, одновременно с переводом стрелок. Включение переменного или постоянного тягового тока поставлено в зависимость от рода тяги электровоза, для которого готовится маршрут.

2. Во всех маршрутах пусковые цепи соответствующих электроприводов переключателей контактной сети размыкаются при тех же условиях безопасности, что и пусковые цепи стрелок, чем исключается возможность смены напряжений в контактной сети над электроподвижным составом.

3. Изменение рода тягового тока в контактной сети над приемоотправочным путем исключается при установленном на данный путь электровозном маршруте или при наличии на пути электровозов любого рода тока.

4. Прибытие локомотива на путь фиксируется системой счета. Система счета фиксирует прибытие на путь поезда или одиночного локомотива.

5. Система счета допускает возможность передачи на путь, занятый локомотивом, второго локомотива. Подача на путь более двух локомотивов исключается невозможностью установки следующего маршрута до тех пор, пока не будет произведена уборка хотя бы одного из ранее поданных локомотивов.

6. Допускаются маневровые маршруты автономным локомотивом (тепловозом, паровозом и др.) на приемоотправочный путь при наличии на нем одного электровоза любого рода тока.

7. Предусматривается возможность искусственного размыкания контактной сети над приемоотправочным путем и сброс лишнего счета при отсутствии на пути локомотива.

8. Размыкание секций контактной сети осуществляется после полного освобождения задним пантографом электровоза данной секции.

9. После прохода поезда в секциях контактной сети сохраняется напряжение тягового тока последнего использованного маршрута.

Все поездные и маневровые маршруты разделяются на три вида:

- 1) маршруты электротяги постоянного тока;
- 2) маршруты электротяги переменного тока;
- 3) маршруты автономной тяги.

Такое разделение маршрутов определяется особенностями установки и контроля маршрута каждого из родов тяги. Так, при установке маршрута электротяги того или иного рода тока должны быть обеспечены включение в контактную сеть тягового тока и проверка его соответствия роду тяги электровозу, для которого устанавливается маршрут. В то же время при установке маршрута автономной тяги переключения и проверки контактной сети не требуется. Кроме того, каждый род маршрута имеет особенности по враждебности, требующие специальных схемных решений:

– род тягового тока, подаваемого в контактную сеть, определяется родом тока на предмаршрутном участке;

– наличие маршрутов автономной тяги и приборов, контролирующих положение переключателей контактной сети, позволяет осуществить зависимости, при которых исключается установка электротягового маршрута на неэлектрифицированный путь и тем самым ликвидируются возможные ошибки дежурного по станции и машиниста электровоза;

– по одному и тому же светофору, расположенному в районе контактной сети, может быть установлен как электротяговый маршрут, так и маршрут автономной тяги;

– выбор того или иного маршрута осуществляется: в централизованных районах – автоматически, а на входах в район переключаемых секций со стороны несменяемой контактной сети – дежурным постом централизации.

На данный момент в России функционируют 26 станций стыкования: Артышта-2 Западно-Сибирской ж. д., Бабаево Октябрьской ж. д., Балезино Горьковской ж. д., Белореченская Северо-Кавказской ж. д., Вековка Горьковской ж. д., Владимир Горьковской ж. д., Вязьма Московской ж. д., Горячий Ключ Северо-Кавказской ж. д., Данилов Северной ж. д., Дербент Северо-Кавказской ж. д., Дружинино Свердловской ж. д., Инзер Куйбышевской ж. д., Иртышское Западно-Сибирской ж. д., Карталы-1 Южно-Уральской ж. д., Мариинск Красноярской ж. д., Междуреченск Западно-Сибирской

ж. д., Пенза-1 Куйбышевской ж. д., Пенза-3 Куйбышевской ж. д., Пресногорьковская Южно-Уральской ж. д., Рыбное Московской ж. д., Рязань-2 Московской ж. д., Свирь Октябрьской ж. д., Сухиничи-Главные Московской ж. д., Сызрань-1 (Южный Парк) Куйбышевской ж. д., Узуново Московской ж. д., Черепаново Западно-Сибирской ж. д. Также на Южно-Уральской ж. д. есть станция Магнитогорск-Грузовой, которая является станцией стыкования переменного тока 25 кВ со стороны федеральной железной дороги и переменного тока 10 кВ со стороны станций Входная и Гранитная, принадлежащих Магнитогорскому металлургическому комбинату.

## 2. Безостановочный пропуск двухсистемных поездов

Наличие станций стыкования на маршрутах следования поездов имеет ряд существенных недостатков. В среднем на смену электровоза в грузовом движении затрачивается не менее часа с учетом времени на закрепление и раскрепление состава, маневровую работу на размен локомотивов и выполнение обязательного полного опробования тормозов. В элемент простоя на станциях стыкования могут входить также и непроизводительные потери, такие как время ожидания электровоза нужного рода тока, нитки графика, особенно на участках с интенсивным движением пассажирских поездов, и др. Все это негативно влияет на скорость движения поездов, т. е. на один из важнейших качественных показателей работы. В частности, из-за простоя на станции стыкования маршрутная скорость движения следующих через нее поездов снижается на 40–80 км/сут и более [20].

В связи с этим было решено разработать двухсистемный электроподвижной состав. Первые советские двухсистемные грузопассажирские электровозы серии ВЛ82 были построены в 1966 г. Всего был построен 91 электровоз серии ВЛ82 и ВЛ82<sup>М</sup>.

В современной России начали выпускать пассажирские двухсистемные электровозы ЭП10 (было построено всего 12) и ЭП20, а также грузовой электровоз двойного питания 2ЭВ120 (выпущено пока 3). Также у нас в стране эксплуатируются двухсистемные электропоезда ЭС1/ЭС2Г «Ласточка» (Siemens Desiro RUS), Sm6 «Аллегро», ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан» (Siemens Velaro RUS).

На участках, где работают только тепловозы и двухсистемные электровозы и электропоезда, на перегонах организуют нейтральные вставки, позволяющие двухсистемному электроподвижному составу проходить пункты стыкования без остановки на выбеге.

У нас в стране такими участками являются перегон Бусловская Октябрьской ж. д. – Вайникалла финляндской ж. д. на границе Ленинградской области с Финляндией и перегон Разъезд 5 км – Разъезд 12 км на участке Адлер – Роза Хутор Северо-Кавказской ж. д.

Для организации безостановочного пропуска двухсистемного электроподвижного состава по станции стыкования необходимо изменить алгоритм работы электрической централизации на данных станциях.

Впервые алгоритм пропуска двухсистемных поездов был разработан институтом «Гипротрансигналсвязь» – филиалом ОАО «Росжелдорпроект» в 2009 г. для станции Владимир Горьковской ж. д. в целях уменьшения времени хода высокоскоростных поездов на участке Москва – Нижний Новгород. На основе этого алгоритма на станциях стыкования вводится режим пропуска двухсистемных поездов (ДП). Такой пропуск предусматривается по каждому главному пути в четном и нечетном направлении с возможностью выхода на другой главный путь.

Для выполнения условий исключения перекрытия секций контактной сети с различными видами тягового тока токоприемниками ДП, обращаемых на станции, а также для исключения выхода электропоезда на секцию с другим родом тока в случае неопускания токоприемника (неисправны локомотивные устройства, определяющие род тока в контактной сети) в горловинах станции секции контактной сети отключаются от тягового тока и замыкаются в отключенном состоянии в маршрутах пропуска ДП. Выбор отключаемых секций зависит от максимального расстояния между токоприемниками двухсистемного электроподвижного состава. Длина отключаемых секций обеспечивает торможение ДП в случае неопускания токоприемников вследствие неисправности локомотивных устройств.

При приеме (пропуске) двухсистемного поезда по главным путям в четном или нечетном направлениях и при возникновении неисправности ДП, находящегося на пути приема, предусматривается возможность подачи автономного маневрового локомотива в хвост ДП. В этом случае действия дежурного по станции заключаются в следующем:

- по команде ДСП машинист ДП опускает пантограф электровоза;
- ДСП искусственно размыкает контактную сеть на пути приема ДП, тем самым обеспечивается возможность снятия враждебности для задания маневрового маршрута в хвост неисправному ДП или в аналогичных экстренных ситуациях.

Для организации смены рода тока ДП и исключения выхода поездов с односистемной тягой (ОП) на маршруты для ДП вводятся дополнительные сигнальные показания в соответствии с Руководящими указаниями по применению светофорной сигнализации в ОАО «РЖД» РУ-55-2012:

1. Показание «Д» («Задан маршрут для ДП») на маршрутных указателях входных светофоров. Для маршрутов ОП на указателях включается показание «Э», для маршрутов автономной тяги указатели не включаются.

При негорящем указателе входного светофора (нет показания на указателе «Д») машинист ДП должен принять меры к остановке поезда.

В случае появления на маршрутном указателе входного светофора сигнального показания «Д» перед ОП должна быть обеспечена остановка

поезда темпом экстренного торможения от указанных светофоров до точки смены рода тока.

2. Показание «•\_•» («Отключить режим тяги, опустить токоприемник») включается на вновь устанавливаемых маршрутных указателях опускания пантографа. Данное показание включается только в маршрутах для ДП. Для маршрутов ОП на указателях включается показание «Э». Для маршрутов автономной тяги указатель не включается. Указатели опускания пантографа устанавливаются перед отключаемыми секциями контактной сети на расстоянии, обеспечивающем восприятие их показаний машинистами и срабатывание локомотивных устройств по отключению режима тяги с опусканием токоприемников (с учетом движения с расчетной скоростью).

3. Показание «|\_|» («Поднять токоприемник, включить режим тяги») включается на вновь устанавливаемых маршрутных указателях поднятия пантографа. Данные указатели устанавливаются на пути приема за выключенными секциями контактной сети на расстоянии, обеспечивающем подъем токоприемников и включение режима тяги после вступления ДП на секции контактной сети со сменяемым родом тока. Для маршрутов ОП на указателях включается показание «Э». Для маршрутов автономной тяги указатель не включается [21].

Проверка и определение мест установки маршрутных указателей (на входных светофорах и отдельно стоящих) для организации пропуска двухсистемных поездов по станции производятся на основании тяговых и тормозных расчетов, произведенных для пассажирских, пригородных и грузовых поездов.

Выполняется расчет для определения максимально допустимой скорости проследования маршрутных указателей опускания пантографа, с которой обеспечивается остановка поезда двухсистемного питания в пределах обесточенного участка (когда не происходит опускание токоприемников при входе на обесточенный участок).

В случае ошибочных действий ДСП при приеме ДП он может быть принят на станцию по показанию «Э» с остановкой на приемоотправочном пути со сменяемым родом тока. В этом случае смена рода тока будет производиться на приемоотправочном пути методом искусственной разделки контактной сети.

При установке маршрута безостановочного пропуска ДП по команде поездного диспетчера дежурный по станции дает специальную директиву по пропуску ДП системе электрической централизации и задает маршрут приема. При этом отключаемая секция контактной сети переключается на ток перегона приема и контролируется, а затем напряжение отключается и она замыкается в маршруте в отключенном состоянии. Секции контактной сети, находящиеся за отключаемой секцией, переключаются на ток перегона отправления и замыкаются в маршруте приема.

После замыкания маршрута, с проверкой отключенного состояния отключаемой секции контактной сети и установленного режима ДП, включаются следующие показания маршрутных указателей:

- «• •» – на маршрутном указателе опускания пантографа;
- « $\left[ \_ \right]$ » – на маршрутном указателе поднятия пантографа;
- «Д» – на маршрутном указателе входного светофора.

После этого открывается входной светофор.

Затем ДСП обычным порядком задает маршрут передачи и отправления с пути, на который установлен маршрут приема ДП. Поскольку род тока в контактной сети этого пути уже установлен маршрутом приема ДП, то по маршрутам передачи и отправления с пути контактная сеть автоматически устанавливается в соответствии с родом тока контактной сети перегона отправления.

При вступлении головы ДП за маршрутный указатель опускания пантографа машинист в ручном режиме должен опустить токоприемники переменного тока.

При наличии соответствующих технических решений по локомотивным устройствам в увязке с приборами БЛОК или КЛУБ, для ДП опускание токоприемников может производиться автоматически, без участия машиниста, от воздействия приборов БЛОК или КЛУБ на локомотивные устройства.

Поезд проследует отключенную от напряжения секцию контактной сети с опущенными токоприемниками.

При вступлении головы ДП за маршрутный указатель поднятия пантографа машинист в ручном режиме должен поднять токоприемники постоянного тока, включить вспомогательные машины и далее – тяговый режим.

Поднятие токоприемников и включение тяги, помимо ручного режима, может осуществляться и по сигналам приборов БЛОК или КЛУБ при наличии соответствующих технических решений.

В этом случае воздействие на бортовые устройства локомотива по маршрутам движения ДП происходит при проследовании ДП контрольных точек, которые должны быть увязаны с местами расположения маршрутных указателей опускания и поднятия пантографа и учтены при проектировании устройств БЛОК или КЛУБ.

Далее поезд следует по маршруту электротяги постоянного тока обычным порядком.

При проследовании ДП по маршруту секции маршрута и контактной сети размыкаются обычным порядком, при этом отключаемая секция контактной сети остается в отключенном состоянии и включается и работает при соответствующем роде тока при задании следующих маршрутов для ОП.

Для обеспечения безостановочного пропуска ДП на станции должны предусматриваться переустройство контактной сети и установка пунктов

переключения, в которых будут располагаться выключатели напряжения секций контактной сети, отключаемые для смены рода тяги. В настоящее время в качестве выключателей напряжения секций контактной сети применяются ячейки переключателя пункта переключения станции стыкования 1С-ПВ-3,3/27,5 ООО «НИИЭФА-Энерго».

Данный алгоритм уже реализован на станциях Владимир, Вязьма, Горячий Ключ, Рязань-2. Безостановочный пропуск спроектирован также на станции Сухиничи-Главные и в ближайшее время будет реализован.

## Заключение

По мере развития техники электрификация железных дорог в нашей стране происходила сначала постоянным током, а затем переменным. Внедрение двухсистемного электроподвижного состава было медленным, в связи с чем в нашей стране широко применяются так называемые станции стыкования. Станции стыкования позволяют осуществлять безостановочный пропуск только поездов автономной тяги. При пропуске электроподвижного состава требуется отцеплять электровоз одной тяги, убирать его в оборотное депо или тупик и прицеплять электровоз другой тяги. При этом средствами автоматики переключается контактная сеть с одной тяги на другую. Недостатками такого способа является удорожание электрификации и содержание устройств электроснабжения, а также необходимость смены локомотива и связанных с этим дополнительных материальных, организационных и временных затрат. Значительное время занимает не столько смена электровоза, сколько опробование тормозов. В последнее время стали появляться как двухсистемные электровозы, так и электропоезда. Для уменьшения времени следования двухсистемного электроподвижного состава были специально разработаны и реализованы алгоритмы работы систем автоматики на станциях стыкования и внедрены новые дополнительные сигнальные показания.

## Библиографический список

1. Сотников Е. А. Железные дороги мира из XIX в XXI век / Е. А. Сотников. – М. : Транспорт, 1993. – 200 с.
2. Хворост Н. В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н. В. Хворост, Н. В. Панасенко // Электротехника і Електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 104–114.
3. Frey S. Railway Electrification System & Engineering / S. Frey. – Delhi : White Word Publications, 2012. – 145 p.
4. Baxter A. Network Rail A Guide to Overhead Electrification 132787-ALB-GUN-EOH-000001 / A. Baxter // Alan Baxter & Associates LLP. – February 2015. – Review 10. – 52 p.
5. Konghirun M. Railway electrification and railway traction systems / M. Konghirun. – Electrical Engineering Department King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2017. – 144 p.

6. Oura Y. Railway Electric Power Feeding Systems / Y. Oura, Y. Mochinaga, H. Nagasawa // *Japan Railway & Transport*. – June 1998. – Review 16. – Pp. 48–58.
7. Kocaarslan I. Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink / I. Kocaarslan, M. T. Akçay, S. E. Ulusoy, E. Bal, H. Tiryaki // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. – 2017. – N 25. – Pp. 4254–4267.
8. Sharma K. Power Quality Mitigation in Electric Traction By Using Facts Device / K. Sharma, R. Rahangdale // *International Journal of Applied Science Engineering and Management*. – 2015. – Vol. 2. – Issue 1. – Pp. 1-6.
9. Srivastava J. K. Review on Railway Traction Power Supply System / J. K. Srivastava, V. K. Singh, A. K. Singhal // *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology JECET*. – September 2013 – November 2013. – Vol. 2. – N 4. – Pp. 1236–1250.
10. Котельников А. В. Эффективность электрификации железных дорог и перспективы дальнейшего ее развития в России / А. В. Котельников, Н. С. Белоглазова // *Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы : мат-лы Международного симпозиума «Eltrans'2001», 23–26 октября 2001 г., ПГУПС*. – СПб., 2002. – С. 46–56.
11. Киселев И. П. Развитие высокоскоростного подвижного состава / И. П. Киселев // *Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы : мат-лы Международного симпозиума «Eltrans'2001», 23–26 октября 2001 г., ПГУПС*. – СПб., 2002. – С. 190-199.
12. Русак А. Д. Современный электроподвижной состав железных дорог России и проблемы его развития / А. Д. Русак // *Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы : мат-лы Международного симпозиума «Eltrans'2001», 23–26 октября 2001 г., ПГУПС*. – СПб., 2002. – С. 176–181.
13. Гукун А. П. Модернизация электроснабжения железных дорог в надежных руках / А. П. Гукун // *Наука и транспорт*. – 2008. – С. 54–56.
14. Карта-схема железных дорог России. – URL : [http://visual.rzd.ru/static/public/ru%3FSTRUCTURE\\_ID%3D5180](http://visual.rzd.ru/static/public/ru%3FSTRUCTURE_ID%3D5180).
15. Battistelli L. Power Quality Disturbances due to Interaction between AC and DC Traction Systems / L. Battistelli, P. Caramia, G. Carpinelli, D. Proto // *Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004)*, Edinburgh, UK, March 31 – April 2, 2004. – Pp. 492–497.
16. Railway Technical Research Institute. Concurrent-feeding power switching system for Shinkansen switching sections (in Japanese). Retrieved 21 May 2011. – URL : [http://www.rtri.or.jp/events/forum/2008/pdf/4\\_1.pdf](http://www.rtri.or.jp/events/forum/2008/pdf/4_1.pdf).
17. Brenna M. The compatibility between DC and AC supply of the Italian railway system / M. Brenna, F. Foiadelli // *Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA, 2011, July 24–29*. – Pp. 1–7.
18. Brenna M. Evaluation of the interferences in the interconnection point between 2×25kVac High-Speed railway lines and 3 kVdc regional system / M. Brenna, F. Foiadelli, M. Roscia, D. Zaninelli // *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lodz, Poland, September 15–17, 2009*. – Pp. 1–6.
19. ООО «НИИЭФА-Энерго». Пункты группировки модульного типа ПГ-М-3,3/27,5 Каталог-128-2016-01. – URL : <http://www.nfenergo.ru/content/files/catalog1/128201601.pdf>.
20. Малахов А. В. Повышение эффективности работы стыковых станций и смежных участков при эксплуатации в грузовом движении электровозов двойного питания /

- А. В. Малахов, В. Ю. Пермикин, Э. В. Васильев // Транспорт Урала. – 2017. – № 2 (53). – С. 32–36.
21. Руководящие указания по применению светофорной сигнализации в ОАО «РЖД» РУ-55–2012 : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 20.12.2013 N 2832 р. – СПб. : Ги-протрансигалсвязь – филиал ОАО «Росжелдорпроект», 2013. – 124 с.

*Michael A. Gordon*

Institute «Giprotranssignalsvyaz» – department of JSC «Roszheldorproject»

### **Features of operation of train control systems at joining traction stations in the Russian Federation**

The article considers the history of the development of the electrification of railways in our country. The world experience is also considered. Various systems for the electrification of railways are described, both by current and voltage, and by the type of contact network. A comparison of the electrification system with direct current with the system on alternating current is made. The international experience of the problem of connecting trains on the borders of sections of railways with different kinds of electric traction is presented. The existing approaches to the construction of train traffic control systems in the places of joining different kinds of traction current are described. The technology of joining traction stations operation in our country is described. The structure of the overhead line at the joining traction station is explained. The principles of interaction of signaling and centralization systems at a joining traction station with overhead line devices are presented. The control elements of the switching sections of the overhead line are shown. A list of all existing joining traction stations in our country is presented. A negative assessment was made of the joining traction stations in conditions of transit traffic of trains. The history of development of a multi-system electric rolling stock in our country is considered. A method for organizing the non-stop pass of a multi-system electric rolling stock on polygons with different types of thrust is proposed. The necessary changes in the arrangement of the overhead line and necessary changes in the algorithms of the work of the joining traction stations are described. A new signaling at the joining traction stations for –system trains was introduced, introduced by the Guidelines for the use of traffic signaling in JSC «Russian Railways» RU-55–2012, which provides for the organization of a change in the type of current by multi-system trains and the exclusion of trains with single-system traction for routes for multi-system trains. The actions of the yardmasters and the engine drivers during the passage and reception of multi-system trains at the joining traction stations are considered. These solutions have already been implemented at the stations of Vladimir of the Gorky Railway, Vyazma of the Moscow Railway, Goryachy Klyuch of the North Caucasus Railway, Ryazan-2 of the Moscow Railway.

joining traction station; railway electrification system; train control systems; sectional strain insulator of overhead line; switch of overhead line; multi-system electric locomotive; nonstop pass of multi-system electric locomotive

## References

1. Sotnikov Y. A. (1993). The world's railways from the 19th to the 21st century [Zheleznye dorogi mira iz XIX v XXI vek.]. Moscow, Transport. – 200 p.
2. Hovorost N. V., Panasenko N. V. (2003). Electric railways: stages and prospects of development [Ehlektricheskie zheleznye dorogi: ehtapy i perspektivy razvitiya]. Electrical Engineering and Electromechanics [Elektrotehnika i Elektromekhanika], issue 4. – Pp. 104–114.
3. Frey S. (2012). Railway Electrification System & Engineering. Delhi, White Word Publications. – 145 p.
4. Baxter A. (2015). Network Rail A Guide to Overhead Electrification 132787-ALB-GUN-EOH-000001. Alan Baxter & Associates LLP, February 2015, Review 10. – 52 p.
5. Konghirun M. (2017). Railway electrification and railway traction systems. Electrical Engineering Department King Mongkut's University of Technology Thonburi. – 144 p.
6. Oura Y., Mochinaga Y., Nagasawa H. (1998). Railway Electric Power Feeding Systems. Japan Railway & Transport. Review 16, June 1998. – Pp. 48–58.
7. Kocaarslan I., Akçay M. T., Ulusoy S. E., Bal E., Tiryaki H. (2017). Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, issue 25. – Pp. 4254–4267.
8. Sharma K., Rahangdale R. (2015). Power Quality Mitigation in Electric Traction By Using Facts Device. International Journal of Applied Science Engineering and Management, vol. 2, issue 1. – Pp. 1–6.
9. Srivastava J. K., Singh V. K., Singhal A. K. (2013). Review on Railway Traction Power Supply System. Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology JECET, September 2013 – November 2013, vol. 2, issue 4. – Pp. 1236–1250.
10. Kotelnikov A.V., Beloglazova N. S. (2002). Efficiency of railway electrification and prospects for its further development in Russia [Ehffektivnost ehlektrifikacii zheleznyh dorog i perspektivy dalnejshego ee razvitiya v Rossii]. Electrification and development of rail transport in Russia. Traditions, modernity, prospects. Materials of the international symposium Eltrans'2001, St. Petersburg, October 23–26, 2001 [Elektrifikaciya i razvitie zheleznodorozhnogo transporta v Rossii Tradicii sovremennost perspektivy Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans'2001, Sankt-Peterburg, 23–26 oktyabrya 2001 g]. St. Petersburg, SPOISU [St. Petersburg, SPOISU]. – Pp. 46–56.
11. Kiselev I. P. (2002). Development of high-speed rolling stock [Razvitie vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava]. Electrification and development of rail transport in Russia. Traditions, modernity, prospects. Materials of the international symposium Eltrans'2001, St. Petersburg, October 23–26, 2001 [Elektrifikaciya i razvitie zheleznodorozhnogo transporta v Rossii Tradicii sovremennost perspektivy Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans'2001, Sankt-Peterburg, 23–26 oktyabrya 2001 g]. St. Petersburg, SPOISU [St. Petersburg, SPOISU]. – Pp. 190–199.
12. Rusak A.D. (2002). Modern electric rolling stock of Russian railways and the problems of its development [Sovremennyj ehlektropodvizhnoj sostav zheleznyh dorog Rossii i problemy ego razvitiya]. Electrification and development of rail transport in Russia. Traditions, modernity, prospects. Materials of the international symposium Eltrans'2001, St. Petersburg, October 23–26, 2001 [Ehlektrifikaciya i razvitie

- zheleznodorozhnogo transporta v Rossii Tradicii sovremennost perspektivy Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans'2001, Sankt-Peterburg, 23–26 oktyabrya 2001 g]. St. Petersburg, SPOISU [St. Petersburg, SPOISU]. – Pp. 176–181.
13. Gukun A. P. (2008). Modernization of power supply of railways in reliable hands [Modernizaciya ehlektrosnabzheniya zheleznih dorog v nadezhnyh rukah.]. Science and transport [Nauka i transport]. – Pp. 54–56.
  14. Map-diagram of the railways of Russia. URL: [http://visual.rzd.ru/static/public/ru%3FSTRUCTURE\\_ID%3D5180](http://visual.rzd.ru/static/public/ru%3FSTRUCTURE_ID%3D5180).
  15. Battistelli L., Caramia P., Carpinelli G., Proto D. (2004). Power Quality Disturbances due to Interaction between AC and DC Traction Systems. Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004), 31 March – 2 April 2004, Edinburgh, UK. – Pp. 492–497.
  16. Railway Technical Research Institute. Concurrent-feeding power switching system for Shinkansen switching sections (in Japanese). Retrieved 21 May 2011. URL: [http://www.rtri.or.jp/events/forum/2008/pdf/4\\_1.pdf](http://www.rtri.or.jp/events/forum/2008/pdf/4_1.pdf).
  17. Brenna M., Foiadelli F. (2011). The compatibility between DC and AC supply of the Italian railway system. Power and Energy Society General Meeting, 24–29 July 2011, San Diego, USA. – Pp. 1–7.
  18. Brenna M., Foiadelli F., Roscia M., Zaninelli D. (2009). Evaluation of the interferences in the interconnection point between 2×25 kVac High-Speed railway lines and 3kVdc regional system. 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 15–17 September 2009, Lodz, Poland. – Pp. 1–6.
  19. NIEFA-ENERGO, LLC. Points of grouping modular type PG-M-3,3/27,5. Catalog – 128-2016-01. URL: <http://www.nfenergo.ru/content/files/catalog1/128201601.pdf>.
  20. Malakhov A. V., Permikin V. Yu., Vasilyev E. V. (2017). Improvement of efficiency of work of butt-joint stations and contiguous section in operation in the traffic movement of locomotive of double supply [Povyshenie ehffektivnosti raboty stykovykh stancij i smezhnykh uchastkov pri ehkspluatatsii v gruzovom dvizhenii ehlektrovozov dvojnogo pitaniya]. Transport of the Urals [Transport Urala], issue 2 (53). – Pp. 32–36.
  21. Guidelines for the use of traffic signaling in JSC «Russian Railways» RU-55–2012, approved by the decree of JSC «Russian Railways» dated 20.12.2013 N 2832p [Rukovodyashchie ukazaniya po primeneniyu svetofornoj signalizacii v OAO «RZHD» RU-55-2012 ot 20.12.2013. N 2832r]. S-Petersburg, «Giprotranssignalsvyaz» – department of JSC «Roszheldorproject» [«Giprotranssignalsvyaz» – filial OAO «Roszheldorproject»]. – 124 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Шамановым  
Поступила в редакцию 09.07.2018, принята к публикации 31.08.2018*

*ГОРДОН Михаил Аркадьевич – главный специалист отдела автоматики и телемеханики института «Гипротрансигналсвязь» – филиала АО «Росжелдорпроект».*

e-mail: [gordon\\_ma@mail.ru](mailto:gordon_ma@mail.ru)

© Гордон М. А., 2019

УДК 681.518.5:624.21

**В. П. Голюк,  
Д. Г. Назаров**

ООО «Мостовое бюро», Санкт-Петербург

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ УКЛАДКИ  
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬСТВА  
АВТОДОРОЖНОГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ**

При строительстве мостовых сооружений особое внимание уделяется геометрическим параметрам. Одним из важнейших параметров ездового полотна является ровность оснований и покрытий. Геодезические работы предусматривают комплексный подход к контролю ровности слоев оснований, который включает в себя: геодезическую съемку ездового полотна, проверку рабочей документации, контроль выставления копирной струны, геометрический контроль ровности уложенного асфальтобетонного покрытия плиты проезжей части для сталежелезобетонного пролетного строения и мостового полотна для металлического пролетного строения.

Рассматривались и опробировались разные варианты контроля высотного положения копирной струны и уложенного асфальтобетонного покрытия (методами тригонометрического и геометрического нивелирования). Дана априорная оценка точности результатов измерений для каждого из методов контроля алгебраической разности высотных отметок (амплитуд).

В статье предлагается комбинированный подход к геодезическому контролю ровности асфальтобетонного покрытия на всех стадиях производства работ.

ровность оснований и покрытий; геометрическое нивелирование; тригонометрическое нивелирование; априорная оценка точности результатов измерений; алгебраическая разность высотных отметок (амплитуд)

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-78-93.

**Введение**

Транспортный переход через Керченский пролив является крупнейшим проектом в истории отечественного мостостроения. Крымский мостовой переход – грандиозное сооружение. В общей сложности его протяженность составит 19 км, на которых предполагаются автомобильная и железная дороги. Согласно плану, перспективная интенсивность движения по автомагистрали в обоих направлениях предполагается равной почти 40 тыс. автомобилей в сутки. По железной дороге за такой же промежуток времени пройдут более сотни поездов. Основные технические характеристики мостового перехода представлены ниже.

Внеклассный большой мост начинается на Таманском полуострове, пересекает акваторию Керченского пролива и заканчивается на Керченском полуострове.

Схема моста для автодороги  $L_p = 218 \times 63 + 220 + 54 \times 63$  м. Длина автодорожного моста  $L = 17\,728,4$  м. Параметры автомобильной дороги: категория дороги – I б; габарит проезжей части – 2Г-11,5 м; наличие тротуаров – предусматриваются два служебных похода.

Пролетные строения автодорожного моста имеют длину 63 м, разрезные, балочные сплошностенчатые, сталежелезобетонные с ездой поверху, индивидуальной проектировки. В поперечном сечении имеют четыре главные балки жесткости двутаврового сечения. Главные балки объединены поверху поперечными балками, установленными с шагом 3 м. Высота главных балок 3,6 м.

Пролетное строение автодорожного моста длиной 220 м выполнено в виде арки с жесткой затяжкой, цельнометаллическое, с ортотропной плитой проезжей части. Подвески гибкие из высокопрочных прядей. Деформационные швы модульного типа с допустимыми перемещениями  $\pm 40$  мм,  $\pm 120$  мм,  $\pm 160$  мм.

Одежда ездового полотна автопроезда и тротуаров принята из асфальтобетонной мелкозернистой смеси типа Б марки I [1] толщиной 110 мм, состав которой должен соответствовать требованиям по работе дорожной одежды на ортотропной плите. Общий вид мостового перехода через Керченский пролив представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Мостовой переход через Керченский пролив

## 1. Постановка задачи

Для надлежащего выполнения работ по укладке асфальтобетонного покрытия в соответствии с [2] на всех стадиях производств работ требуется комплексный подход по контролю геометрических параметров. Необходимы корректные исходные данные для разработки картограммы толщин

асфальтобетонного покрытия, анализа проектных решений по картограммам толщин асфальтобетонного покрытия, контроль выставления копирных струны при укладке нижнего слоя асфальтобетонного покрытия, геометрический контроль нижнего слоя асфальтобетонного покрытия, контроль ровности верхнего слоя асфальтобетонного покрытия.

## 2. Подготовительный этап

Проектная организация при разработке рабочей документации выдает в табличной форме ведомость толщин асфальтобетонного покрытия по створам (рис. 2).

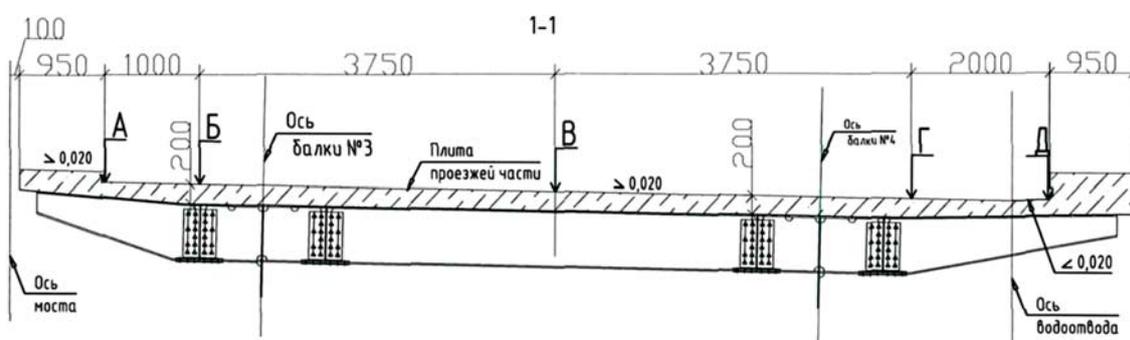


Рис. 2. Схема картограммы плиты проезжей части

В картограмме толщин проезжей части указываются параметры (табл. 1, 2).

Таблица 1. Картограмма толщин плиты проезжей части (1)

№ сечения	Пикет	Отметки струны, м						Отметки асфальта, 40 % врем. нагрузки, м					
		А	Б	В	Г	Ось водоотвода	Д	А	Б	В	Г	Ось водоотвода	Д
1	99+05,99	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514
2	99+07,95	8,727	8,707	8,632	8,557	8,525	8,517	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514
3	99+10,00	8,730	8,710	8,635	8,560	8,528	8,520	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514
4	99+15,00	8,738	8,718	8,643	8,568	8,536	8,528	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514
5	99+20,00	8,744	8,724	8,649	8,574	8,542	8,534	8,725	8,705	8,630	8,555	8,523	8,515
6	99+25,00	8,751	8,731	8,656	8,581	8,549	8,541	8,726	8,706	8,631	8,556	8,524	8,516
7	99+30,00	8,751	8,731	8,656	8,581	8,549	8,541	8,726	8,706	8,631	8,556	8,524	8,516
8	99+35,00	8,752	8,732	8,657	8,582	8,550	8,542	8,726	8,706	8,631	8,556	8,524	8,516
9	99+40,00	8,749	8,729	8,654	8,579	8,547	8,539	8,725	8,705	8,630	8,555	8,523	8,515
10	99+45,00	8,745	8,725	8,650	8,575	8,543	8,535	8,724	8,704	8,629	8,554	8,522	8,514

Таблица 2. Картограмма толщин плиты проезжей части (2)

№ сечения	Рабочие отметки, м				Δ за прогиб, м				R <sub>кривой</sub> , м						
	А	Б	В	Г	Ось водоотвода	Д	А	Б	В	Г	Ось водоотвода	Д	5 м	10 м	20 м
1							0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
2	0,121	0,131	0,125	0,114	0,109	0,101	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	прямая		
3	0,129	0,135	0,125	0,121	0,126	0,117	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	прямая	-100 000	
4	0,124	0,131	0,131	0,135	0,129	0,120	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	-25 000	-50 000	
5	0,111	0,133	0,127	0,126	0,124	0,118	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	прямая	прямая	400 000
6	0,106	0,115	0,118	0,121	0,125	0,110	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	25 000	50 000	100 000
7	0,100	0,123	0,124	0,129	0,140	0,115	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	прямая	50 000	100 000
8	0,096	0,113	0,119	0,122	0,114	0,109	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	25 000	50 000	100 000
9	0,103	0,121	0,122	0,127	0,122	0,107	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	прямая	прямая	прямая
10	0,104	0,130	0,123	0,122	0,122	0,115	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	-25 000	-50 000	-100 000

Руководствуясь данными геодезической съемки, строят картограммы толщин плиты проезжей части для сталежелезобетонного пролетного строения и мостового полотна для металлического пролетного строения. Для выполнения геодезической съемки рекомендовано закладывать временные реперы [3] в середине пролета над опорами в банкетную часть пролетного строения сверлением либо приваркой мебельных болтов с обеспечением дальнейшей их сохранности на весь период выполнения работ по укладке асфальтобетонного покрытия (табл. 3).

**Таблица 3.** Данные геодезической съемки

№ сечения	Пикет	Банкетка	Кромка	1 м	4,750	8,500	10,100	Кромка 2	Банкетка 2
ДШ151				8,702	8,627	8,550			
1	99+05,99								
2	99+07,95	8,745	8,600	8,570	8,501	8,437	8,410	8,410	8,662
3	99+10,00	8,747	8,595	8,569	8,504	8,433	8,396	8,397	8,646
4	99+15,00	8,762	8,608	8,581	8,506	8,427	8,401	8,402	8,660
5	99+20,00	8,769	8,627	8,585	8,516	8,442	8,412	8,410	8,655
6	99+25,00	8,790	8,639	8,610	8,532	8,454	8,418	8,425	8,676
7	99+30,00	8,790	8,645	8,602	8,526	8,446	8,403	8,420	8,675
8	99+35,00	8,807	8,650	8,613	8,532	8,454	8,430	8,427	8,671
9	99+40,00	8,790	8,640	8,602	8,526	8,446	8,419	8,426	8,680
10	99+45,00	8,778	8,635	8,589	8,521	8,447	8,415	8,414	8,677

На основании проектных решений выполняется установка деформационных швов. При этом осуществляется геометрический контроль рабочей поверхности деформационного шва. Точность установки в плане 5 мм, по высоте от 0 до 3 мм в соответствии с требованиями [4, 5], что, в свою очередь, должно обеспечивать заданную плавность сопряжения поверхности окаймления деформационного шва с последующем укладыванием асфальтобетонного покрытия.

Подрядная организация, выполняющая работы по устройству плиты проезжей части для сталежелезобетонного пролетного строения, производит при необходимости работы по доведению поверхности плиты проезжей части до указанных проектной организацией высотных отметок (см. табл. 1).

После контрольных измерений высотной составляющей участков, на которых выполнялись работы по шлифовке, проводятся работы по устройству гидроизоляционного покрытия.

### 3. Устройство нижнего слоя асфальтобетонного покрытия

При геодезической разбивке устанавливаются кронштейны (рис. 3). Согласно этой схеме, вдоль кромки будущего покрытия и параллельно ему восстанавливают разметку с закреплением точек (краской), центры которых соответствуют очертанию кромки будущего покрытия, по ним предварительно была выполнена геодезическая съемка и выдана картограмма толщин. Расстояние точек от кромки должно быть таким, чтобы они находились в зоне, доступной для щупового датчика системы нивелирования асфальтоукладочного комплекса. Принималось во внимание также расстояние между кронштейнами (5 м) с учетом уменьшения провисания копирной струны.

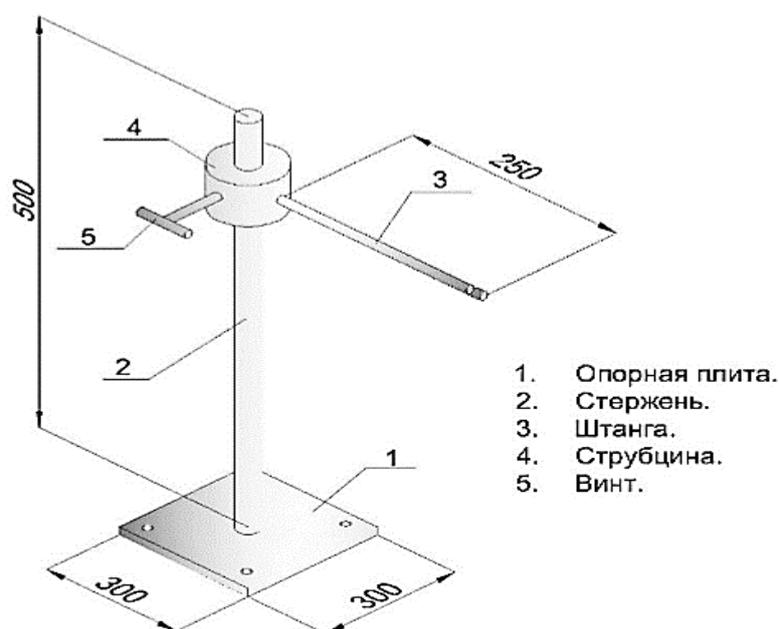


Рис. 3. Кронштейн для установки копирной струны

Копирные струны являются базой для работы автоматических систем обеспечения ровности, поэтому точность и тщательность выполнения операций по установке копирных струн является одним из важнейших условий обеспечения качества работ. Установку копирных струн производят перед устройством асфальтобетонного покрытия. Для установки струн необходимы металлические стойки в комплекте с поперечными штангами и струбцинами. Штанги закрепляются на стойках на требуемой высоте с помощью зажимных винтов, они могут перемещаться по стойке в горизонтальной плоскости в струбцине. На конце штанги имеется прорезь для установки в нее струны. Струны устанавливают с одной стороны проезжей части. Струна должна быть строго параллельна оси дороги.

Металлические стойки с поперечными штангами и струбцинами устанавливаются так, чтобы штанга, на которой будет лежать копирная струна, находилась точно над ранее закрепленной точкой. С помощью нивелира закрепляем струбциной штангу на высоте  $h$ , полученной по формуле

$$a + \text{const} + b + c = h, \quad (1)$$

где  $a$  – рабочая отметка, полученная в результате наложения проектного продольного профиля на фактический продольный профиль существующего основания;  $\text{const}$  – высота установки считывающего датчика относительно плиты асфальтоукладчика;  $b$  – величина, учитывающая коэффициент уплотнения;  $c$  – величина, учитывающая строительный подъем.

После этого производится геодезическая съемка по штангам (методом тригонометрического нивелирования). Результаты пересчитываются на абсолютные отметки по формуле

$$H - c - b - \text{const} = HP, \quad (2)$$

где  $H$  – отметка, полученная в результате геодезической съемки по штангам;  $\text{const}$ ,  $b$  – см. формулу (1).

Полученные отметки проверяются с помощью метода амплитуд на правильность установки струны. При необходимости делается коррективка. Все геодезические работы и работы по установке копирной струны производятся на подготовленной плите мостового полотна, освобожденной от каких-либо сторонних нагрузок, а именно: дорожно-строительной техники, дополнительных временных ограждающих конструкций, вспомогательных приспособлений и механизмов, не относящихся к конструкции мостового перехода. После установки стоек производят натяжение струн.

Оценка ровности покрытия при контроле качества строительных работ регламентируется СП 78.13330.2012. Параметры ровности оснований и покрытий при этом способе оцениваются в соответствии с СП 78.13330.2012. Для определения длинных (затяжных) волн используется метод амплитуд. Измерения ровности поверхности основания и покрытия следует производить путем нивелировки на расстоянии 0,5–1,0 м от каждой кромки покрытия или края полосы движения с шагом 5 м, захватками  $\approx 220$  м. На основании полученных вертикальных отметок следует вычислять алгебраические разности отметок точек (амплитуда) по формуле

$$\delta h_i = \left[ \frac{h_{i-k} + h_{i+k}}{2} - h_i \pm \Delta_i \right], \quad (3)$$

где  $h_i$  – относительная отметка точки, для которой оценивается отклонение;  $h_{i-k}$ ,  $h_{i+k}$  – относительные отметки предыдущей и последующей точек соответственно;  $i$  – порядковый номер точки;  $i-k$  и  $i+k$  – порядковые

номера предыдущей и последующей точек;  $\Delta_i$  – значение поправки, учитывающей радиус вертикальной кривой.

$$\Delta_i = 125 \left( \frac{L^2}{R} \right), \quad (4)$$

где  $L$  – длина прямой между смежными точками, м;  $R$  – радиус вертикальной кривой, м.

С помощью данной формулы (3) производится вычисление ровности, при этом если участок находится на вертикальной кривой, в результат вводится поправка (см. табл. 3), которая предусматривает получение значений по модулю, однако для наглядности значения неровностей целесообразно брать истинными. Пример полевого контроля ровности выставляемый струны показан на рис. 4.



**Рис. 4.** Камеральная обработка результатов измерений ровности копирной струны

Вычисления неровностей выполняются для амплитуд 5, 10, и 20 м со сдвигом на 5 м. Затем производится подсчет неровностей, превышающих допустимое значение. При этом 90 % определений должны быть в пределах, указанных в табл. 1, а 10 % определений не должны превышать эти значения более чем в 1,5 раза.

По результатам геодезической съемки выполнялась корректировка установленной копирной струны (рис. 5) на соответствие требованиям ровности асфальтобетонного покрытия [6–10]. Пример расчета приведен в табл. 4.

Далее выполнялся контроль геометрических параметров нижнего слоя асфальтобетонного покрытия (см. табл. 4).

Таблица 4. Расчет ровности копирной струны

№ сечения	Пикет	Отметки струны проект, м		Отметки струны факт, м		$\Delta H$ , мм		$\Delta$ на прогиб, м		$\Delta$ на уплотнение, м		$R_{кривой}$ , м			с шагом 5 м, допуск 5 мм		с шагом 10 м, допуск 8 мм		с шагом 20 м, допуск 16 мм	
		А	Д	А	Д	А	Д	А	Д	А	Д	5 м	10 м	20 м	А	Д	А	Д	А	Д
1	99+05,99	8,984	8,774	8,984	8,774	0	0	0,000	0,000	0,010	0,010									
2	99+07,95	8,990	8,777	8,989	8,778	-1	1	0,003	0,003	0,014	0,011	прямая								
3	99+10,00	8,994	8,782	8,994	8,782	0	0	0,006	0,006	0,014	0,012	прямая	-100 000							
4	99+15,00	9,002	8,793	9,002	8,792	0	-1	0,014	0,014	0,014	0,014	-25 000	-5 0000							
5	99+20,00	9,009	8,797	9,007	8,799	-2	2	0,019	0,019	0,014	0,013	прямая	прямая	400 000						
6	99+25,00	9,012	8,803	9,010	8,804	-2	1	0,025	0,025	0,011	0,012	25 000	50 000	100 000						
7	99+30,00	9,014	8,805	9,015	8,804	1	-1	0,025	0,025	0,012	0,013	прямая	50 000	100 000						
8	99+35,00	9,013	8,804	9,014	8,803	1	-1	0,026	0,026	0,011	0,012	25 000	50 000	100 000						
9	99+40,00	9,011	8,802	9,009	8,802	-2	0	0,024	0,024	0,012	0,013	прямая	прямая	прямая						
10	99+45,00	9,008	8,797	9,009	8,798	1	1	0,021	0,021	0,014	0,012	-25 000	-50 000	-100 000						

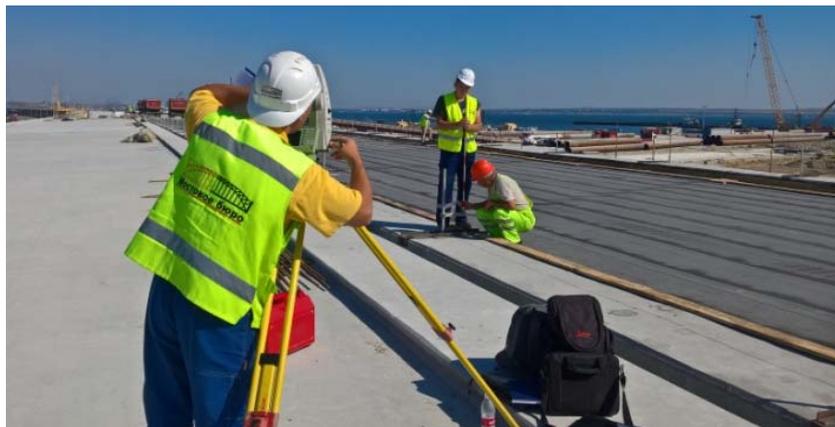


Рис. 5. Контроль высотного положения копирной струны

## 4. Описание методики выполнения геодезического контроля

### 4.1. Тригонометрическое нивелирование

При односторонних измерениях превышение вычисляют по формуле

$$h = D \cdot \operatorname{ctg}(Z) + i + f - l, \quad (5)$$

где  $D$  – горизонтальное проложение;  $Z$  – зенитное расстояние;  $f$  – поправка за кривизну земли и рефракцию;  $i$  – высота инструмента;  $l$  – высота визирной цели;

$$f = \frac{(l - k)}{2R} D^2, \quad (6)$$

где  $R$  – средний радиус Земли (6371 км);  $k$  – коэффициент рефракции (0,13÷0,14).

Рассмотрим источники погрешности тригонометрического нивелирования на основании принципа равных влияний:

$$m_h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial D}\right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2} + \left(\frac{\partial h}{\partial k}\right)^2 m_k^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial i}\right)^2 m_i^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial l}\right)^2 m_l^2}, \quad (7)$$

где  $m_d$  – среднеквадратическое отклонение измерения расстояния;  $m_z$  – среднеквадратическое отклонение измерения зенитного расстояния;  $m_k$  – среднеквадратическое отклонение определения коэффициента рефракции;  $m_i$  и  $m_l$  – среднеквадратическое отклонение измерения высоты инструмента и визирной цели;  $\rho = 206\,265$  – коэффициент перехода от угловых величин к линейным (модуль сопряжения).

Получим формулу априорной оценки тригонометрического нивелирования с учетом кривизны земли и рефракции [11]:

$$m_h = \sqrt{(m_D \times \text{ctgz})^2 + \left(\frac{m_z \times D}{\rho \times \sin^2 z}\right)^2 + \left(\frac{m_k \times D^2}{2R \times \sin^2 z}\right)^2} + m_i^2 + m_v^2. \quad (8)$$

Примем, что измерения проводятся электронным тахеометром SET230:  $m_D = 1$  мм,  $m_z = 1,5''$ ,  $m_k = 0,1$ ,  $Z = 88^\circ$ ,  $D = 110$  м, тогда для принятых значений получим  $m_h = 1,5$  мм.

Составляющая ошибки тригонометрического нивелирования зависит от погрешности определения коэффициента рефракции и значительно возрастает с увеличением расстояния ( $D$ ).

Если составляющая ошибки тригонометрического нивелирования по точности определения коэффициента рефракции пропорциональна квадрату расстояния, то влияние правильности определения коэффициента рефракции на точность тригонометрического нивелирования значительно возрастает с увеличением расстояний.

Коэффициент рефракции можно вычислить по измеренным метеорологическим элементам, но этот способ малоэффективен, так как коэффициент рефракции по каждому направлению свой и формируется подстилающей поверхностью. Приземный слой воздуха (1–6 м) – наиболее активный и сложный в оптическом отношении. Основное влияние на формирование коэффициента рефракции оказывает температурный градиент, который в нижних слоях воздуха значительно зависит от свойств подстилающей поверхности. Большое влияние на изменение коэффициента рефракции оказывают погодные условия и в первую очередь наличие или отсутствие прямой солнечной радиации.

Другой путь ослабления влияния внешней среды на точность тригонометрического нивелирования – выполнение избыточных измерений для получения фактического значения коэффициента рефракции. Среди таких способов – синхронные двухсторонние наблюдения. В этом случае превышение между точками может быть вычислено по формуле

$$h_{1,2} = D \cdot \text{ctg} \frac{Z_{2,1} - Z_{1,2}}{2} + \frac{i_1 + l_1}{2} + \frac{i_2 + l_2}{2}, \quad (9)$$

где  $D$  – горизонтальное проложение;  $Z_{1,2}$  и  $Z_{2,1}$  – прямое и обратное зенитное расстояние;  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  – соответственно высоты приборов и визирных целей.

Если необходимо выполнить тригонометрическое нивелирование через широкое водное препятствие, то рекомендуем выполнять синхронные двухсторонние наблюдения.

Основная погрешность этого метода – различие коэффициентов рефракций прямого и обратного лучей:

$$\Delta h_k = \frac{(k_1 - k_2) \cdot D^2}{4 \cdot R}. \quad (10)$$

Чтобы снизить влияние внешней среды, нужно принимать во внимание следующие обстоятельства:

- наблюдения нужно проводить не раньше, чем через 30 минут после восхода солнца и не позже, чем через 30 минут после его захода;
- в летний период с 9 до 17 часов коэффициент рефракции более устойчив;
- пасмурная погода более благоприятна для наблюдений;
- зимнее время вообще непригодно для тригонометрического нивелирования;
- высота прохождения луча должна быть не менее 1,5 м над поверхностью.

Тригонометрическое нивелирование можно выполнять для расстояний до 300 м прибором с точностью измерения зенитного расстояния не грубее 3". При расстояниях более 300 м необходимо использовать прибор с погрешностью измерения зенитных расстояний 1–2". Измерения необходимо выполнять в прямом и обратном направлении в наиболее благоприятных условиях.

Тригонометрическое нивелирование применяется также для передачи высот на пункты геодезической разбивочной основы в случае, когда геометрическое нивелирование применить невозможно. Это могут быть пункты, поднятые на монтажные горизонты.

Априорную оценку точности без учета кривизны Земли и рефракции выполним по формуле

$$m_h = \sqrt{\left(2 \cdot \sin \frac{z}{2} \cdot m_D\right)^2 + \left(D \cdot \cos \frac{z}{2} \cdot \frac{m_z}{\rho}\right)^2}. \quad (11)$$

Подставив заданные выше параметры, получим  $m_h = 1,5$  мм.

#### 4.2. Геометрическое нивелирование

Геометрическое нивелирование выполнялось по программе III класса. Невязка хода ( $f$ ) определяется как

$$f = \pm 10\sqrt{L_{\text{км}}} = 3,3 \text{ м}, \quad (12)$$

где  $L$  – длина хода в километрах 110 м.

На основании критерия Райта – Шовене [6]

$$\delta = tm, \quad (13)$$

где  $t$  – величина, равная 2; 2,5; 3, указанная при разработке проекта производства геодезических работ, в нашем случае 2,5;  $m$  – среднеквадратическая погрешность;  $\delta$  – предельное отклонение.

Отсюда получим  $m = \frac{\delta}{t} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ мм}$ . Для расчета среднеквадратической погрешности используем  $m = \pm 4\sqrt{0,110} = 1,3 \text{ мм}$ .

свой погрешности используем  $m = \pm 4\sqrt{0,110} = 1,3 \text{ мм}$ .

## 5. Устройство верхнего слоя асфальтобетонного покрытия

После укладки нижнего слоя асфальтобетонного покрытия выполняется разметка контрольных точек, далее – геодезическая съемка по контролю ровности уложенного слоя асфальтобетонного покрытия [12].

Работы по устройству верхнего слоя асфальтобетонного покрытия производятся с применением копирной лыжи, при этом особое внимание уделяется сопряжению верхнего слоя покрытия с рабочей гранью деформационного шва. Для обеспечения плавного перехода устанавливалась копирная струна за 25 м до деформационного шва. Контроль ровности асфальтобетонного покрытия [7, 13–16] представлен в табл. 5.

**Таблица 5.** Расчет ровности верхнего слоя асфальтобетонного покрытия

№ амплитуды	Пикет	Отметка, м	Значение амплитуды, мм
1	99+05,99	8,709	–
2	99+07,95	8,708	–
3	99+10,00	8,713	–
4	99+15,00	8,725	–
5	99+20,00	8,732	–4
6	99+25,00	8,739	0
7	99+30,00	8,741	1
8	99+35,00	8,745	3
9	99+40,00	8,744	4
10	99+45,00	8,738	3
11	99+55,00	8,731	3

## Заключение

Приведена расширенная информация о производстве работ по устройству асфальтобетонного покрытия на мостовых сооружениях. Показан порядок взаимодействия проектных и подрядных организаций на всех этапах устройства асфальтобетонного покрытия. Приведены примеры исходной информации для принятия проектных решений и выходной информации по контролю геометрических параметров асфальтобетонного покрытия.

Дана априорная оценка погрешности применяемых методов тригонометрического и геометрического нивелирования. Предложены рекомендации по применению вышеуказанных методов производства работ по контролю ровности оснований и покрытий.

По результатам контрольных геодезических измерений можно сделать вывод о фактической ровности всех слоев асфальтобетонного покрытия на мостовых сооружениях. Предложенный комбинированный подход оптимизирует производство работ и обеспечивает их выполнение в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, обобщает все этапы по устройству асфальтобетонного покрытия.

## Библиографический список

1. ГОСТ 9128–97. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. – [М., 1997].
2. ГОСТ Р 56925–2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий. – [М., 2016].
3. СП46.13330.2012. Мосты и трубы Актуализированная редакция СНиП 3.06.04–91, изд. – [М., 2012].
4. ОДМ 218.2.025–2012. Деформационные швы мостовых сооружений на автомобильных дорогах. – М., 2012.
5. Контроль качества на строительстве мостов / ОАО «Институт “Гипростроймост”». – М., 2010.
6. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85 (с изменением № 1). – [М., 2012].
7. Геодезические работы в строительстве СП 126.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03–84. – [М., 2012].
8. Лушников Н. А. К вопросу об оценке продольной ровности покрытий автомобильных дорог / Н. А. Лушников, П. А. Лушников // Дороги и мосты : сб. статей ФГУП «РосдорНИИ». – 2010. – Вып. № 23/1. – С. 97–104.
9. Красиков О. А. Оценка ровности автомобильных дорог с использованием международного индекса ровности / О. А. Красиков // Тезисы докл. Всероссийской отраслевой научно-практической конференции. – Саратов, 2003. – С. 31–32.
10. Нестерович И. В. Критерии ровности асфальтобетонных дорожных покрытий и их использование при оценке эксплуатационного состояния автомобильных дорог : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2004. – 23 с.

11. Коугия В. А. Избранные труды / В. А. Коугия. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 378–410.
12. ОДМ 218.7.001–2009. Рекомендации по осуществлению строительного контроля на федеральных автомобильных дорогах / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2009. – 32 с.
13. ISO 8608: 1995. Mechanical vibration – Road surface profile – Reporting of measured data.
14. Gillespie J. S. Transportation Research Board of the National Academies: Journal of the Transportation Research Board // Transportation Research Record. – Washington, D. C. – 2007. – N 1990. – Pp. 32–39.
15. Леонович И. И. Диагностика автомобильных дорог / И. И. Леонович, С. В. Богушович, И. В. Нестерович. – М. : ИНФРА, 2011. – 350 с.
16. Чванов В. В. Обоснование норм продольной ровности дорожных покрытий, методов ее измерения и контроля / В. В. Чванов, Н. А. Лушников, А. М. Стрижевский // Дороги России XXI века. – 2008. – № 6. – С. 58–62.

*Victor P. Goliuk,  
Denis G. Nazarov,  
«Bridge bureau» LLC*

### **Integrated approach to the geodesic control of the installation of asphalt-concrete coating on the example of the construction of the road bridge transition through the Kerch sheet**

During the construction of bridges, special attention is paid to geometrical parameters, one of the most important parameters of the rideable surface is flatness of the bases and coatings. Geodetic control provides a comprehensive approach to solving the problem of controlling the flatness of the base layers: the roadway slab for the composite concrete bridge and the bridge deck for the metal span structure.

Various options for controlling the height position of a copier string and a laid asphalt concrete pavement (using trigonometric and geometric leveling) were considered and tested. A priori estimate of the accuracy of the measurement results for each of the methods for monitoring algebraic difference in elevations (amplitudes) was previously performed.

The article proposes a combined approach to geodesic control at all stages of the production of works to control the flatness of the asphalt concrete pavement.

evenness of bases and coatings; geometric leveling; trigonometric leveling; a priori assessment of the accuracy of measurement results; algebraic difference of elevations (amplitudes)

#### **References**

1. GOST 9128–97. Asphalt road, airfield and asphalt concrete mixtures.
2. GOST R 56925–2016. Roads and airfields. Methods for measuring uneven grounds and coatings.
3. 13330.2012. Bridges and pipes СП46. Updated version of SNiP 3.06.04–91.
4. ODM 218.2.025–2012. Expansion joints of bridge structures on motor roads.

5. Quality control at the construction of bridges of the OJSC «Institute Giprostroymost». Moscow, 2010.
6. Highways SP 78.13330.2012. Updated edition of SNiP 3.06.03–85 (with a change in N 1).
7. Geodetic works in the construction of joint venture 126.13330.2012. Updated edition of SNiP 3.01.03–84.
8. Lushnikov N. A., Lushnikov P. A. (2010). On the issue of assessing the longitudinal evenness of the road pavement [K voprosu ob ocenke prodol'noi' rovnosti pokry'tii' avtomobil'ny'kh dorog]. Roads and bridges (Dorogi i mosty). Collection of articles. FSUE «RosdorNII», N 23/1. – Pp. 97–104.
9. Krasikov O. A. (2003). Estimating the evenness of roads using the international evenness index [Ocenka rovnosti avtomobil'ny'kh dorog s ispol'zovaniem mezhdunarodnogo indeksa rovnosti]. Abstracts of reports. All-Russian branch scientific-practical conference. Ministry of Transport of the Russian Federation. Rosavtodor. Saratov. – Pp. 31–32.
10. Nesterovich I. (2004). Century Criteria of evenness of asphalt concrete pavements and their use in assessing the operational status of roads: synopsis of PhD thesis. [Kriterii rovnosti asfaltobetonnykh dorozhnykh pokrytij i ikh ispol'zovanie pri otsenke ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobilnykh dorog]. Minsk. – 23 p.
11. Kougia V. A. (2012). Selected Works [Izbrannye trudy]. St. Petersburg, PSTU. – Pp. 378–410.
12. ODM 218.7.001–2009. Recommendations for the implementation of construction control on federal highways. Federal Highway Agency (Rosavtodor). Moscow. – 32 p.
13. ISO 8608: 1995. Mechanical vibration – Road surface profile – Reporting of measured data.
14. Gillespie J. S. (2007). Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies. – Washington, D. C., N 1990. – Pp. 32–39.
15. Leonovich I. I., Bogushovich S. V., Nesterovich I. V. (2011). Diagnostics of highways Moscow, INFRA. – 350 p.
16. Chvanov V. V., Lushnikov N. A., Strizhevsky A. M. (2008). Justification of the norms of longitudinal flatness of pavements, methods of its measurement and control [Obosnovanie norm prodol'noi' rovnosti dorozhny'kh pokry'tii', metodov ee izmereniia i kontrolya]. Roads of Russia of the XXI century (dorogi Rossii XXI veka), N 6. – Pp. 58–62.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым  
Поступила в редакцию 17.09.2018, принята к публикации 23.10.2018*

*ГОЛЮК Виктор Петрович* – ведущий инженер-геодезист ООО «Мостовое бюро».  
e-mail: bridges-bureau@gpsm.ru

*НАЗАРОВ Денис Григорьевич* – ведущий инженер-геодезист ООО «Мостовое бюро».  
e-mail: nazarovdg1916@mail.ru

© Голюк В. П., Назаров Д. Г., 2019

УДК 004.492.2

**М. Н. Василенко, д-р техн. наук,  
В. П. Бубнов, д-р техн. наук,  
П. Е. Булавский, д-р техн. наук,  
П. А. Василенко**

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

## **ОШИБКИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ**

Целью данного исследования является доказательство возможности опасного отказа систем управления движением поездов при кибератаках на электронную техническую документацию, на основе которой осуществляются проектирование, производство и эксплуатация устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Введены понятия опасной ошибки в технической документации, опасного технического состояния железнодорожной автоматики и телемеханики, проведен анализ вариантов проникновения опасных ошибок в действующие устройства при кибернарушениях. Рассмотрены варианты сценариев опасных кибернарушений и организационные, технические и программные методы защиты электронной технической документации при переходе на безбумажные технологии проектирования и эксплуатации средств железнодорожной автоматики и телемеханики.

электронная техническая документация; кибернарушение; ошибка в технической документации; опасная ошибка; опасное техническое состояние

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-94-112.

### **Введение**

В настоящее время во всех отраслях науки, техники и производства происходит активное внедрение систем электронного документооборота (СЭД). В хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) такая система разрабатывается и активно внедряется группой предприятий «ИМСАТ». Разработчиками предложена интегрированная базовая платформа интеллектуальной СЭД, включающая функционально полный набор средств автоматизации на основе программных модулей отечественного производства [1].

В связи с высокой степенью готовности СЭД ЖАТ к замене господствующей в настоящее время бумажной технологии ведения технической документации (ТД) на электронную технологию, возникает ряд новых научных задач, связанных со спецификой такого перехода, главные из них:

- обеспечение максимальной эффективности перехода на электронные (безбумажные) технологии ведения ТД ЖАТ;

- защита этой технологии и электронных баз данных технической документации (БД) ТД от возможных кибератак на техническую документацию обеспечивающую безопасность систем ЖАТ, а следовательно, и безопасность движения поездов на железнодорожном транспорте.

В работе [2] впервые введено понятие кибератаки на техническую документацию в электронном виде, приведены анализ и классификация кибератак.

В работе [3] показано, что среди различных видов кибератак на техническую документацию наиболее вероятными и опасными являются кибернарушения типа «ошибка» в ТД. В этом случае возможный «нарушитель» может достичь максимального эффекта за счет исключения проверки условий обеспечения безопасности при высокой сложности обнаружения источника этого нарушения.

В данной работе определяются и анализируются понятия: ошибка в технической документации, ошибка в системе ЖАТ, опасное техническое состояние ЖАТ и опасное технологическое состояние объектов управления. Проводится анализ вариантов сценариев кибернарушений и способов защиты от них.

## 1. Определение и анализ базовых понятий

Определяя понятие ТД ЖАТ [4], необходимо выделить два типа ТД:

- нормативно-справочная, далее НСТД;
- объектная, далее ОТД.

Под НСТД понимаются различные виды ГОСТов, ОСТов, стандартов железнодорожного транспорта, правила технической эксплуатации, инструкции по сигнализации и маневровой работе, инструкции по техническому обслуживанию СЖАТ и содержанию ТД, методические указания, типовые материалы и нормы проектирования и т. п. Характерными особенностями НСТД являются:

- широкий круг пользователей;
- подробное изучение, согласование и утверждение во многих инстанциях;
- публикация в печатных изданиях;
- периодическая проверка и корректировка документов;
- регулярное внесение изменений и дополнений.

На этом основании справедливо утверждение, что НСТД считается эталоном для проектирования, производства и эксплуатации систем ЖАТ.

Объектная техническая документация (ОТД) создается и эксплуатируется для конкретных объектов железнодорожного транспорта (станции, перегоны, переезды, участки и пр.). Различные типы ОТД (проектная, рабочая, конструкторская, строительная, программная, исполнительная и др.) и правила ее содержания описаны в [4], где приведен полный список конкретных технических документов ЖАТ. Виды ОТД показаны на рис. 1.

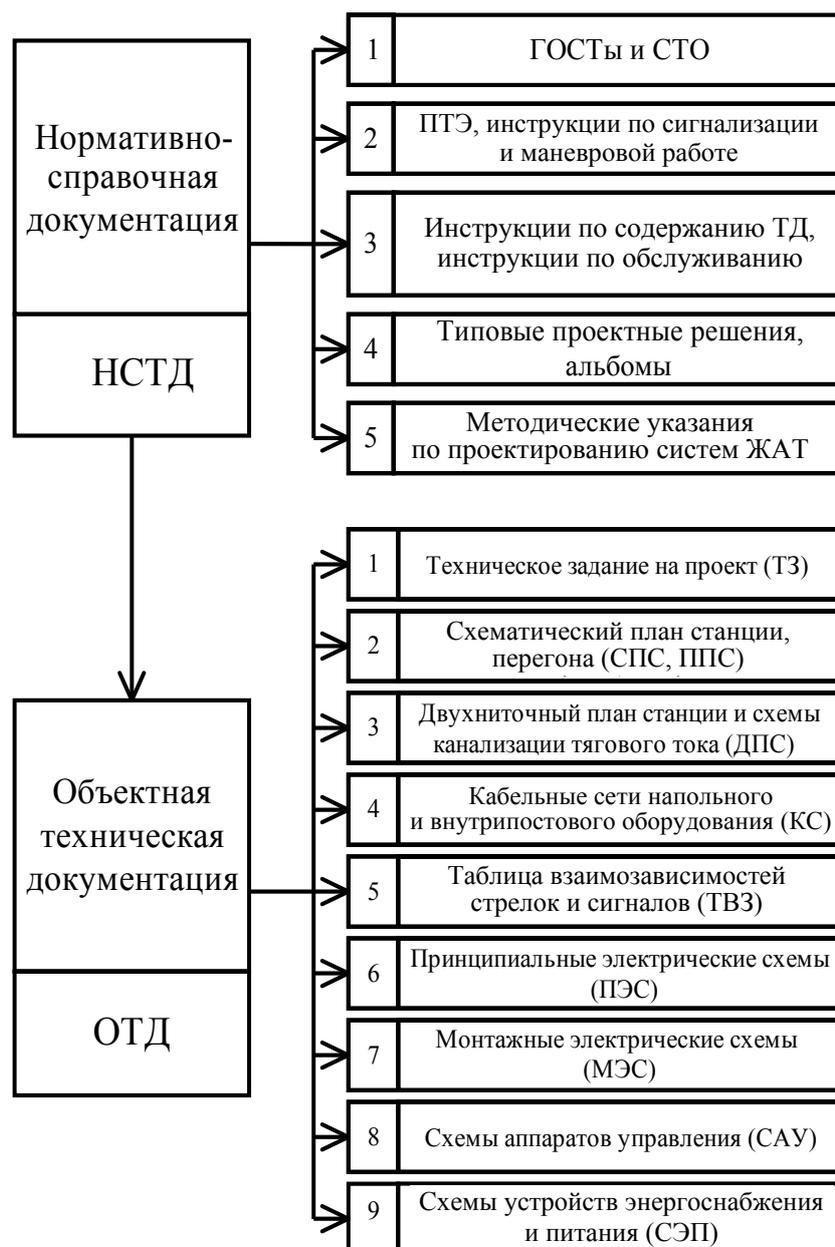


Рис. 1. Виды технической документации

Известная статистика ошибок в ТД [5, 6] при существующей «бумажной» технологии ее создания и сопровождения свидетельствует о низком качестве экспертизы и большом количестве ошибок, которые обнаруживаются при пусконаладочных работах, проводимых при сдаче ЖАТ в эксплуатацию и в процессе опытной эксплуатации. В основном эти ошибки носят случайный характер и обусловлены следующими причинами:

– сравнительно низкий уровень автоматизации проектирования, производства и монтажа устройств ЖАТ и значительное влияние на эти процессы человеческого фактора (уровень квалификации, внимание, степень ответственности и т. д.);

– низкое качество экспертизы ОТД на этапах ее создания и сопровождения в бумажном виде (экспертизу бумажной документации может выполнить только человек – специалист высокой квалификации);

– итоговая проверка во время проведения пусконаладочных работ на действующем образце СЖАТ при ограниченных ресурсах (отсутствие опытных специалистов, ограниченные условия испытаний, отсутствие программ полной функциональной проверки и необходимых средств контроля и диагностики) не гарантирует обнаружение всех видов ошибок в ОТД.

Как следствие этих причин – окончательно согласованная и утвержденная по итогам пусконаладочных работ исполнительная ОТД может содержать ошибки как в самой документации, так и в принятой к эксплуатации систем ЖАТ. На этих основаниях дадим следующие определения.

**Определение 1.** Ошибкой в ОТД считается любое несоответствие требованиям НСТД.

**Определение 2.** Ошибкой в действующей (находящейся в эксплуатации) системе ЖАТ считается любое ее несоответствие требованиям НСТД, реализованных в конкретном проекте на базе исполнительной ОТД (ИОТД).

Возможные источники ошибок в ОТД (включая исполнительную) приведены на рис. 2, из которого следует, что переход ошибок в различных видах ОТД в действующие устройства ЖАТ возможен на любой из семи стадий разработки и эксплуатации систем.

Среди множества требований НСТД, предъявляемых к системам ЖАТ, важнейшими являются требования к обеспечению безопасности управления движением поездов [7–12]. В работе [13] определены основные принципы обеспечения безопасности систем ЖАТ и способы доказательства реализации этих принципов в действующих системах.

В работах [14, 15] приведено математическое описание условий обеспечения функциональной безопасности для систем электрической централизации стрелок и сигналов независимо от их технической реализации (релейные, релейно-процессорные, микропроцессорные). Проведенный авторами анализ показал, что список этих условий для достаточно сложных станций может включать сотни, а иногда и тысячи проверок условий обес-

печения безопасности. Ошибка в ТД, исключая хотя бы одну из этих проверок, при ее реализации в действующей ЖАТ может привести к опасному отказу в управлении движением поездов. Поэтому актуальным является следующее определение.



Рис. 2. Источники ошибок ОТД

**Определение 3.** Опасной ошибкой в ОТД и действующей (находящейся в эксплуатации) системе ЖАТ является любое нарушение требований НСТД в отношении соблюдения условий обеспечения безопасности.

Множество условий обеспечения безопасности для заданной системы ЖАТ формализованно может быть описано как  $УОБ_s = \{Y_i\}_s, i = \overline{1, I_s}$ , где  $Y_i - i_{oe}$  – условие безопасности, принимающее значение 0, если оно не выполнено, и значение 1, если оно выполнено;  $I_s$  – общее число условий безопасности для заданной системы  $S$ .

Выполненный авторами анализ множества УОБ<sub>с</sub> для станционных систем безопасности показывает, что I<sub>с</sub> определяется схематическим планом станции, числом и длиной поездных и маневровых маршрутов. При этом даже для станций с электрической централизацией на 20–30 стрелок I<sub>с</sub> может достигать нескольких тысяч проверок (I<sub>с</sub> = 10<sup>2</sup> – 10<sup>3</sup>).

Пример составления списка проверок условий обеспечения безопасности для одного из маршрутов станции на 24 стрелки приведен на рис. 3 и в таблице.

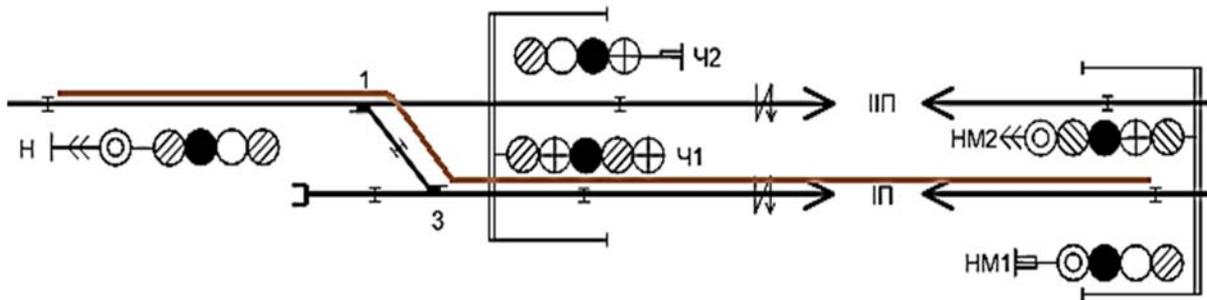


Рис. 3. Маршрут приема на путь I

Условия обеспечение безопасности маршрута приема на путь I

Элемент маршрута	Условия безопасности	Способ проверки
<i>Установка маршрута</i>		
Светофор Н	1. Контроль отсутствия включения пригласительного сигнала на светофоре (26)	Контроль невозможности задания маршрута при горении пригласительного сигнала
	2. Контроль закрытого состояния враждебных светофоров (27)	Контроль невозможности задания маршрута при открытом состоянии враждебных светофоров
...		
<i>Размыкание маршрута</i>		
1СП	18. Контроль крайнего положения ходовых стрелок (1)	Контроль невозможности задания маршрута при неправильном положении ходовой стрелки 1
	19. Защита замкнутых секций от преждевременного размыкания при наложении шунта на рельсовую цепь и снятии его (12)	Проверка отсутствия преждевременного перекрытия светофора при имитации наложения и снятия шунта
...		

Окончание таблицы

Элемент маршрута	Условия безопасности	Способ проверки
<i>Отмена маршрута</i>		
1СП	26. Контроль крайнего положения ходовых стрелок (1)	Контроль невозможности задания маршрута при неправильном положении ходовой стрелки 1
	27. Контроль свободности ходовых секций (5)	Контроль невозможности задания маршрута при имитации занятия секции
	28. Проверка размыкания секций при отмене маршрута по заданному алгоритму (10)	Контроль включения выдержки времени в соответствии с предварительным или окончательным замыканием; факта выдержки времени и размыкания секции по заданному алгоритму
...		
<i>Искусственная разделка</i>		
1СП	32. Проверка размыкания секций при искусственной разделке по заданному алгоритму (11)	Проверка размыкания необходимой секции и факта выдержки необходимого времени
3СП	33. Проверка размыкания секций при искусственной разделке по заданному алгоритму (11)	То же
Ш	34. Проверка размыкания секций при искусственной разделке по заданному алгоритму (11)	То же

*Примечание.* Цифрами в скобках обозначены условия обеспечения безопасности.

Диаграмма влияния ошибок и отказов на безопасность движения поездов приведена на рис. 4, где показано, что ошибки в ТД могут изменять технической состояние систем ЖАТ, переводя систему в защитное или опасное состояние аналогично отказам.

Нахождение систем ЖАТ в опасном состоянии создает условия опасного отказа объекта управления (рис. 5) при соответствующем технологическом состоянии. Понятие технологического состояния объекта управления поясняется рисунком 5, а также временной диаграммой на рис. 6.

Опасный отказ объекта управления происходит при сочетании двух условий:

- 1) переход систем ЖАТ в опасное техническое состояние в результате ошибки;
- 2) соответствующее технологическое состояние объекта управления (на рис. 6 обозначено вертикальной линией).

Например, при наличии в системе ЖАТ опасной ошибки типа «ложный контроль свободности приемоотправочного пути» на станции опасный

отказ объекта управления типа «прием поезда на занятый путь» произойдет при сочетании двух условий:

- 1) наличие ошибки типа «ложный контроль свободности приемоотправочного пути»;
- 2) наличие подвижного состава на пути и задание ДСП маршрута приема на этот путь.

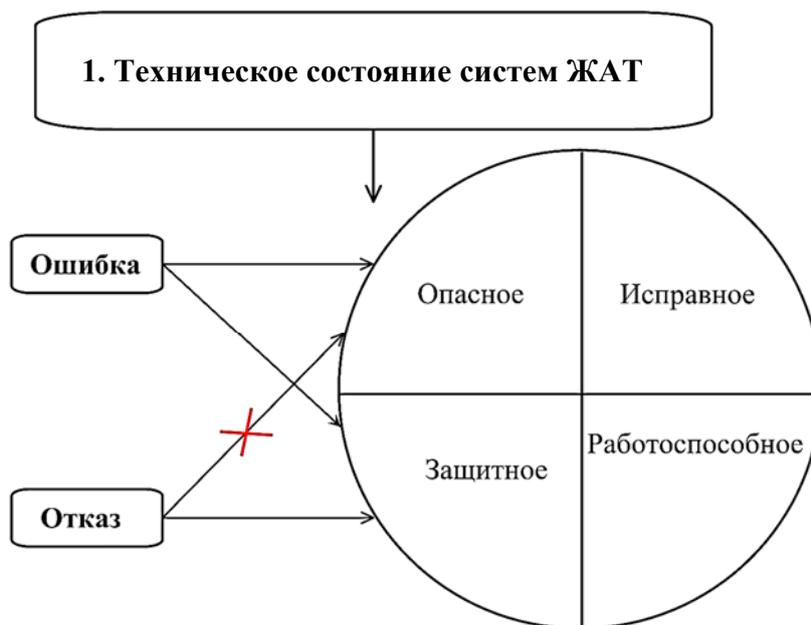


Рис. 4. Диаграмма технического состояния СЖАТ



Рис. 5. Технологическое состояние объекта управления:

$M_i$  – номера маршрутов на станции;  $T_{M_i}$  – технологическое состояние маршрута (установка, размыкание, отмена, разделка);  $T_j$  – момент времени изменения технологического состояния;  $I$  – число маршрутов;  $J$  – число дискретных технологических состояний (протокол работы электрической централизации)

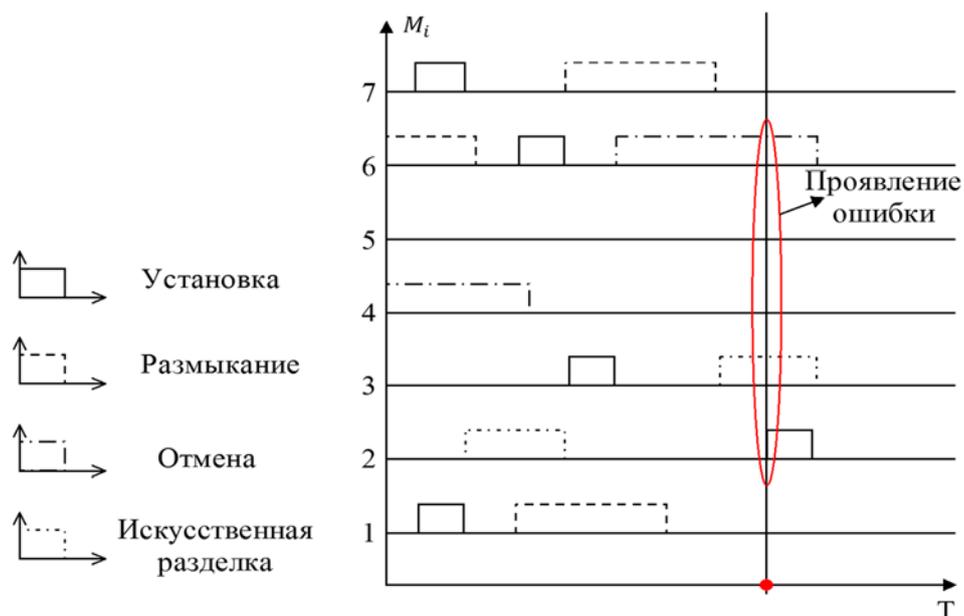


Рис. 6. Временная диаграмма технологического состояния объекта управления

Второе условие в этом случае можно определить как опасное технологическое состояние объекта управления.

Различия между ошибкой в ТД или системе ЖАТ и отказом системы, а также структурная схема влияния ошибок на опасные отказы объектов управления поясняются рисунком 7.

Теория синтеза безопасных систем ЖАТ, разработанная учеными кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского университета путей сообщения [13], описывает методы защиты системы от опасных отказов. При возникновении отказа система попадает в защитное состояние, однако данная теория не рассматривает наличие опасной ошибки в системе, которая при определенной технологической ситуации способна привести к опасному отказу объекта управления.

## 2. Кибернарушение как источник опасных ошибок в системах железнодорожной автоматики и телемеханики

Приведенный выше анализ случайных ошибок в бумажной ТД показал, что они носят непреднамеренный характер, не преследуют специальной цели, обусловлены в основном человеческим фактором и достаточно эффективно обнаруживаются и устраняются, не приводя к нарушению условий безопасности.

Иная ситуация возникает при переходе на электронные технологии ведения БД ТД и отдельных электронных документов. В этом случае встает проблема обеспечения эффективности новой технологии при условии защиты от возможных кибератак на электронные средства хранения, обработки и передачи информации.

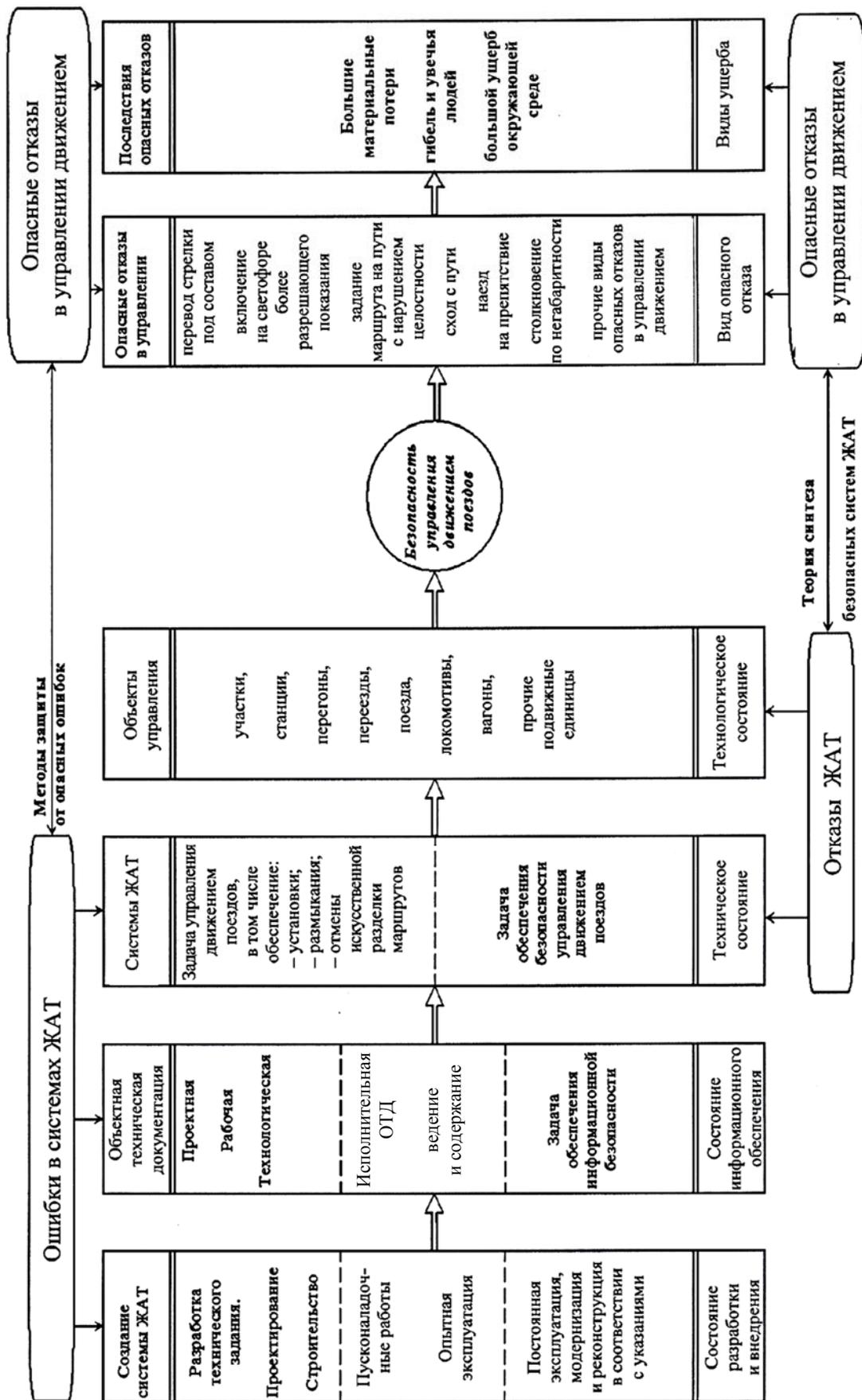


Рис. 7. Отказ и опасная ошибка

В работах [2, 3] показано, что хакерские кибератаки и кибератаки типа «вирус» не могут нанести серьезного ущерба электронным БД ТД при использовании стандартных методов защиты: применение электронной цифровой подписи, корпоративного кодирования информации, резервирования БД и т. п.

Наибольшую опасность создают кибернарушения, связанные с внесением опасных ошибок (см. определение 3) в ТД на разных этапах ее существования и использования (см. рис. 7).

**Определение 4.** Под опасным кибернарушением будем понимать любое несанкционированное воздействие на электронную ОТД специальными программными средствами с целью внесения опасной ошибки (см. определение 3).

Опасное кибернарушение характеризуется следующими особенностями:

1) заключается в умышленном внесении опасной ошибки в ОТД (исполнительную ОТД) с целью нанесения максимального ущерба в работе железнодорожного транспорта;

2) имеет широкий фронт возможностей для проникновения в процесс проектирования, производства, строительства, монтажа и эксплуатации систем ЖАТ с большим числом участников [3];

3) носит скрытый характер и исключает непосредственное воздействие на устройства ЖАТ;

4) имеет сложный способ определения опасного технологического состояния объекта управления, при котором проявится опасный отказ этого объекта;

5) создает условия сложности обнаружения нарушителя за счет различных видов маскировки опасных ошибок.

Понятие маскировки ошибок в ТД определено в [16] и требует дальнейшего исследования.

Для разработки методов защиты электронной ТД от опасных кибернарушений необходимо исследовать возможные сценарии их планирования и реализации. Этапы планирования сценария представлены на рис. 8, а сам сценарий в общем виде – на рис. 9.

Конкретная реализация таких сценариев требует исследования вариантов опасных кибернарушений применительно к конкретным видам систем ЖАТ (станционные, перегонные, переездные, горочные и т. п.) с учетом заданного в техническом задании списка условий обеспечения безопасности. При разработке таких сценариев потенциальный нарушитель планирует не только определенный тип опасной ошибки в ТД, но и способ выполнения кибернарушения в конкретной обстановке (в проектном институте, на сервере БД ТД, в группах ТД, при внесении изменений в действующие схемы и т. п.). Подготовка сценариев возможна только специалистами соответствующей квалификации.

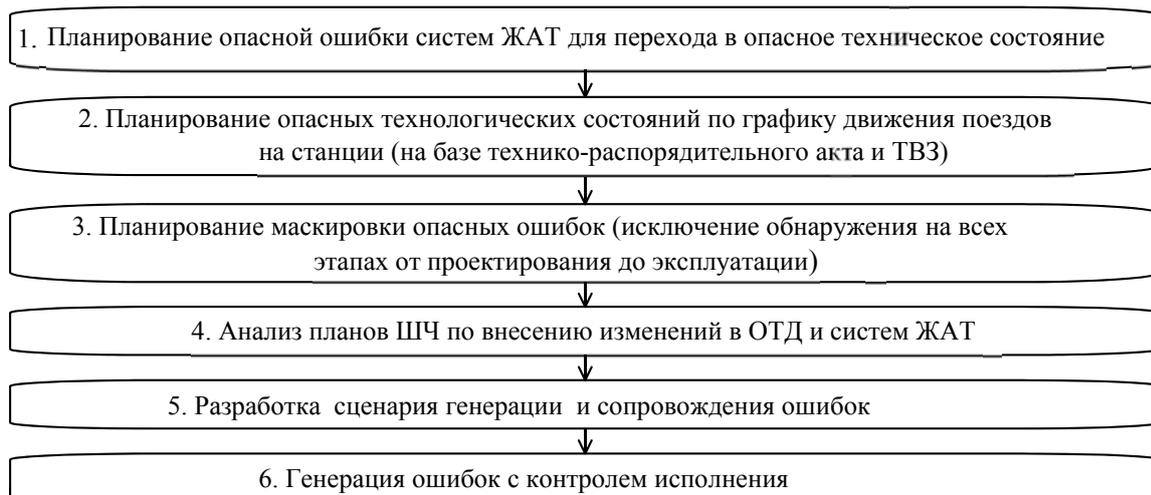


Рис. 8. Этапы подготовки сценария проникновения ошибки

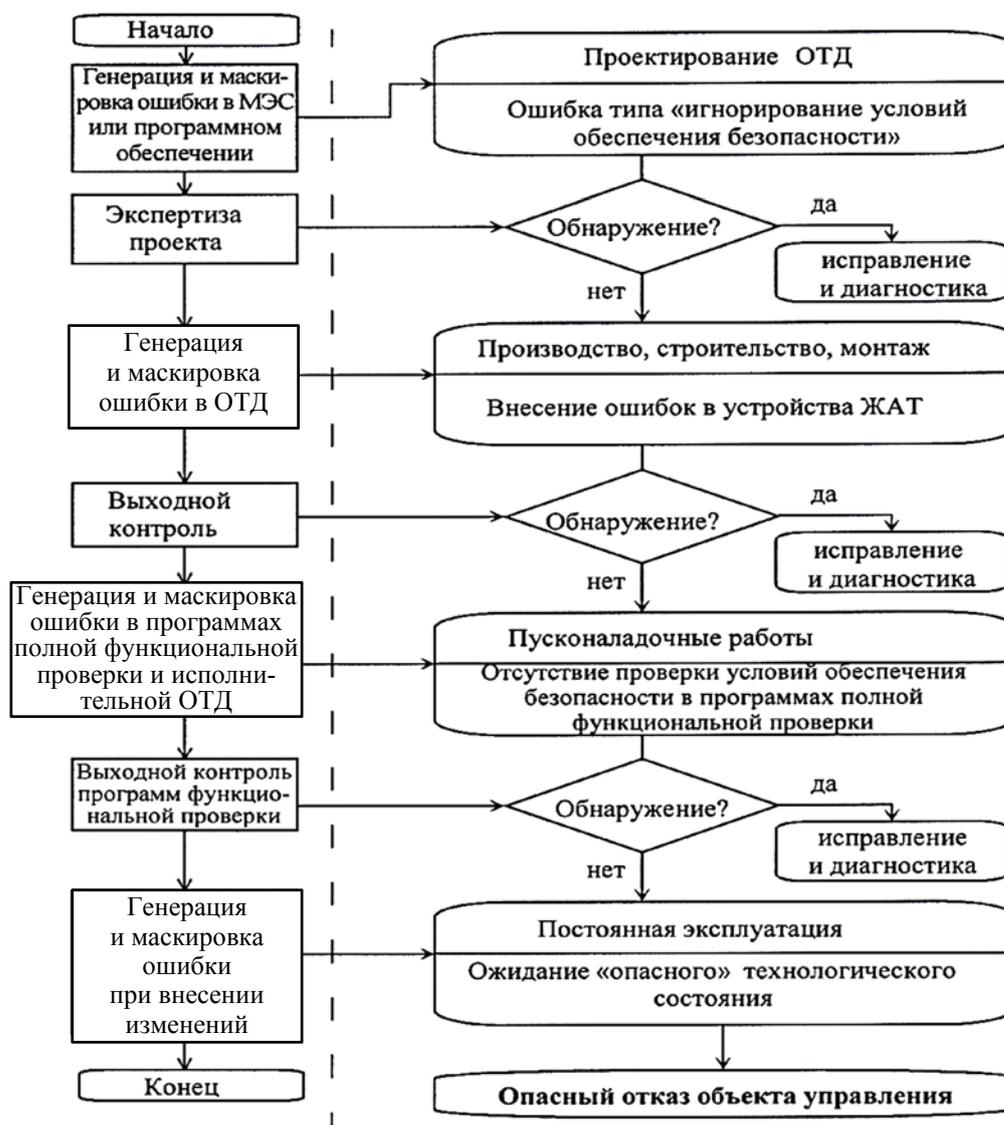


Рис. 9. Сценарий проникновения опасной ошибки

### 3. Методы защиты от опасных кибернарушений в электронной технической документации

Учитывая, что электронные БД ТД являются одним из видов информационного обеспечения систем СЖАТ, при разработке методов защиты необходимо исходить из принятой доктрины информационной безопасности Российской Федерации (утв. Президентом РФ от 9 сентября 2000 г. № Пр-1895), соответствующих указов и стандартов [17–19].

Можно выделить два основных направления работ:

– организационно-технические методы защиты объектной технической документации (рис. 10);

– программно-технические методы защиты (рис. 11).

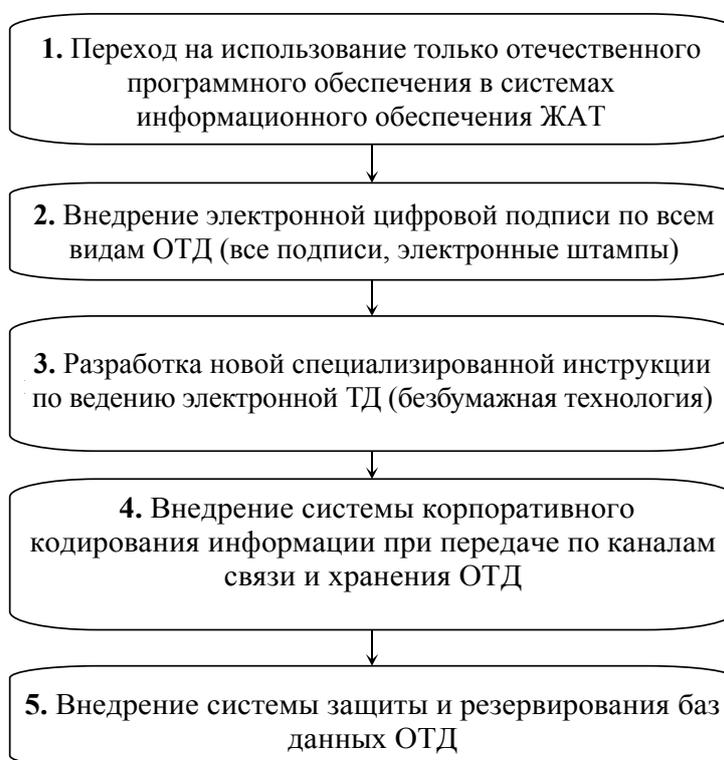


Рис. 10. Организационно-технические методы защиты ОТД

Организационно-технические методы защиты ОТД описаны в [1] и являются неотъемлемой частью систем интеллектуального электронного документооборота хозяйства ЖАТ. Эти методы ориентированы на стандартные решения [17–19], обязательные для всех организаций.

Программно-технические методы защиты ОТД базируются на задачах интеллектуального электронного документооборота (см. рис. 11, задачи 14, 15, 17, 22, 23), разработка которых завершается коллективом НТЦ САПР ПГУПС и фирмой ООО «ИМСАТ». Эти методы ориентированы на обработку электронных моделей ТД в системах документооборота [1].



**Рис. 11.** Программно-технические методы защиты ОТД  
(ОФТД – отраслевой формат технической документации;  
СПС – схематический план станции; ДПС – двухниточный план станции)

## Заключение

Отсутствие высокоэффективной системы электронного документооборота ТД на сети дорог ОАО «РЖД» обусловлено в настоящее время двумя факторами:

– низким коэффициентом заполнения электронных БД ТД; в формате ОФТД заполнено не более 10 % БДТД;

– отсутствием комплексной методологии защиты электронной документации применительно к системам обеспечения безопасности от кибератак и кибернарушений.

С точки зрения обеспечения безопасности движения поездов при кибератаках на электронную ТД наиболее значимыми являются кибернарушения типа «Опасная ошибка».

Введено понятие «опасного кибернарушения» в ТД и показана реальная возможность его перехода в опасный отказ объектов управления (движущихся поездов).

Показано, что обнаружение опасных ошибок систем ЖАТ в процессе пусконаладочных работ в полном объеме с использованием действующих методик и программ проверки реально недостижимо.

Приведен комплекс организационно-технических и программно-технических мер и методик защиты ОТД систем ЖАТ от кибератак и кибернарушений, требующий обязательной реализации на практике.

Результаты исследования весьма актуальны и могут быть применены к ТД и на другие системы обеспечения безопасности на транспорте, в промышленности и оборонных отраслях.

## Библиографический список

1. Василенко М. Н. Состояние внедрения и перспективы развития интеллектуального электронного документооборота хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, П. А. Василенко, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 12. – С. 131–145
2. Василенко М. Н. Кибербезопасность технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Транспорт Российской Федерации – 2015. – № 2 (57). – С. 56–58.
3. Булавский П. Е. Анализ и классификация кибератак на электронную техническую документацию железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, М. Н. Василенко, П. А. Василенко // Известия ПГУПС. – 2018. – № 2. – С. 32–41.
4. Инструкция по ведению технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики (в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 06.10.2017 № 2034р) ЦШ-617-10. EN 50129:2003. – [М., 2017].
5. Тележенко Т. А. Методы и алгоритмы сокращения ошибок проектов железнодорожной автоматики и телемеханики : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. – СПб., 2009. – 173 с. : ил.

6. ТрансЖАТ-2016. Восьмая международная научно-практическая конференция, 5–7 октября 2016 г., Ростов-на-Дону : сб. докладов. – [Ростов н/Д, 2016].
7. CENELEC: Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety [RAMS]. EN 50126:1998.
8. ГОСТ Межгосударственный стандарт 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – [М., 2015].
9. ГОСТ Р МЭК 61508-4–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 4. Термины и определения. – [М., 2012].
10. ГОСТ Р 27.606–2013. Надежность в технике (ССКТ). Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. – [М., 2013].
11. Межгосударственный стандарт 33892–2016. Системы железнодорожной автоматизации и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля. – [М., 2016].
12. Межгосударственный стандарт 33894–2016. Системы железнодорожной автоматизации и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. – [М., 2016].
13. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / Под ред. Вал. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Элмор, 2009. – 900 с.
14. Сапожников Вл. В. Микропроцессорные системы централизации : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков / Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : УМЦ ЖДТ, 2008. – 398 с.
15. Кононов В. А. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций / В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин. – М. : Маршрут, 2003. – 315 с.
16. Гордон М. А. Маскировка ошибок в электронной технической документации и методы их обнаружения / М. А. Гордон, М. Н. Василенко, Д. В. Седых, Д. В. Зуев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 4 (49). – С. 579–591.
17. СТО 56947007-29.240.01.169–2014. Обеспечение информационной безопасности на стадиях жизненного цикла информационных и технологических систем. – [М., 2014].
18. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799–2005. Информационная технология. Практические правила управления информационной безопасностью. – [М., 2005].
19. ГОСТ Р 50.1.053–2005. Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации. – [М., 2005].

*Michael N. Vasilenko,  
Vladimir P. Bubnov,  
Petr E. Bulavsky,  
Petr A. Vasilenko*

«Automation and remote control on railways» department  
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

### **Errors in the technical documentation of railway automation and remote control and their impact on the safety of train traffic**

The purpose of this study is to prove the possibility of dangerous failure of train control systems during cyber attacks on electronic technical documentation, on the basis of which the design, manufacture and operation of railway automation and remote control (RARC) devices are carried out. The concepts of a dangerous error in the technical documentation, the dangerous technical condition of the RARC were introduced, and the analysis of the options for the penetration of dangerous errors into existing devices in cyber-violation was carried out. Variants of scenarios for the conduct of dangerous cyber-breaches are proposed, and organizational, technical, and software methods of protecting electronic technical documentation when switching to paperless design and content technologies are considered.

electronic technical documentation; cyber breach; error in technical documentation; dangerous error; dangerous technical condition

### **References**

1. Vasilenko M. N., Vasilenko P. A., Zuev D. V., Sedy'kh D. V. (2018). The state of implementation and the prospects for the development of intelligent electronic document management of railway automation and remote control [Costoianie vnedreniia i perspektivy' razvitiia intellektual'nogo e'lektronnogo dokumentooborota hoziai'stva zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], N 12. – Pp. 131–145.
2. Vasilenko M. N., Zuev D. V. (2015). Cybersecurity of technical documentation of railway automation and remote control [Kiberbezopasnost' tekhnicheskoi' dokumentatsii zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki]. Transport of Russia [Transport Rossii'skoi' Federatsii], N 2 (57). – Pp. 56–58.
3. Bulavsky P. E., Vasilenko M. N., Vasilenko P. A. (2018). Analysis and classification of cyber attacks on electronic technical documentation of railway automation and remote control [Analiz i klassifikatsiia kiberatak na e'lektronnuiu tekhnicheskuiu dokumentatsiiu zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki]. Proceedings of Petersburg state transport university [Izvestiia PGUPS], N 2. – Pp. 32–41.
4. Instructions for maintaining the technical documentation of railway automation and remote control [Instruktsiia po vedeniiu tekhnicheskoi' dokumentatsii zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki] [Ed. by JSC «Russian railways» order 06.10.2017 N 2034p]. TsSh-617-10. EN 50129:2003.
5. Telezhenko T. A. (2009). Methods and algorithms for reducing errors in railway automation and telemechanics projects [Metody' i algoritmy' sokrashcheniia oshibok

- proektov zheleznodorozhnoi' avtomatiki i telemehaniki]. PhD thesis: 05.22.08. St. Petersburg. – 173 p.
6. TransZHAT–2016. Eighth International Scientific and Practical Conference: proceedings: october 5–7, 2016, Rostov-on-Don.
  7. CENELEC: Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety [RAMS]. EN 50126:1998.
  8. GOST Interstate Standard 27.002–2015. Reliability in Engineering. Terms and Definitions.
  9. GOST R IEC 61508-4–2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic systems related to safety. Part 4. Terms and definitions.
  10. GOST R 27.606–2013. Reliability in engineering (CCTS). Reliability management. Reliability-oriented maintenance.
  11. GOST Interstate Standard 33892–2016. Systems of railway automation and remote control at level crossings. Safety requirements and control methods.
  12. GOST Interstate Standard 33894–2016. Systems of railway automatics and telemechanics at railway stations. Safety requirements and control methods.
  13. Works on the theory of synthesis and diagnosis of finite automata and relay devices (2009). [Trudy' po teorii sinteza i diagnoza konechny'kh avtomatov i relei'ny'kh ustroi'stv]. Ed. by. Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Elmor Publ. – 900 p.
  14. Sapozhnikov Vl. V., Kononov V. A., Kurenkov S. A. (2008). Microprocessor interlocking systems: textbook for technical schools and colleges of railway transport [Mikroprotcessorny'e sistemy' centralizatscii: ucheb. dlia tekhnikumov i kolledzhei' zheleznodorozhnogo transporta]. Ed. by. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, UMC ZhDT Publ. – 398 p.
  15. Kononov V. A., Ly'kov A. A., Nikitin A. B. (2003). Fundamentals of the design of electrical interlocking of stations [Osnovy' proektirovaniia e'lektricheskoi' centralizatscii promezhutochny'kh stantsii']. Moscow, Marshrut Publ. – 315 p.
  16. Gordon M. A., Vasilenko M. N., Sedy'kh D. V., Zuev D. V. (2016). Masking of errors in electronic technical documentation and methods of their detection [Maskirovka oshibok v e'lektronnoi' tekhnicheskoi' dokumentatscii i metody' ikh obnaruzheniia]. Proceedings of PSTU [Izvestiia PGUPS], N 4 (49). – Pp. 579–591.
  17. STO 56947007-29.240.01.169–2014. Ensuring information security at the stages of the life cycle of information and technological systems.
  18. GOST R ISO/IEC 17799–2005. Information technology. Practical rules for managing information security.
  19. GOST R 50.1.053–2005. Information technology. Basic terms and definitions in the field of technical protection of information.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии О. А. Наседкиным  
Поступила в редакцию 15.11.2018, принята к публикации 10.12.2018*

*ВАСИЛЕНКО Михаил Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: 9416579@gmail.com

---

*БУБНОВ Владимир Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: bubnov1950@yandex.ru

*БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: pbulavsky@gmail.com

*ВАСИЛЕНКО Петр Алексеевич* – инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: vasilenko.p.al@gmail.com

© Василенко М. Н., Бубнов В. П., 2019

© Булавский П. Е., Василенко П. А., 2019

УДК 681.518.5:004.052.32

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

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

**Д. В. Ефанов, д-р техн. наук**

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,  
Российский университет транспорта

## **МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОДУЛЬНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ ВЗВЕШЕННЫХ РАЗРЯДОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ОБРАЗУЮЩЕЙ НАТУРАЛЬНЫЙ РЯД ЧИСЕЛ**

Анализируются способы построения двоичных кодов с суммированием с малой избыточностью для решения задач технического диагностирования дискретных систем. Показано, что может быть построен целый класс кодов с суммированием с постоянным числом контрольных разрядов вне зависимости от количества информационных разрядов в кодовом слове. Принципы построения таких кодов основаны на взвешивании разрядов информационного вектора. При этом весовые коэффициенты выбираются из последовательности возрастающих натуральных чисел, а счет осуществляется по заранее установленному модулю в виде степени числа два. Кроме того, для коррекции свойств обнаружения ошибок вычисляются специальные поправочные коэффициенты – свертки по модулю два части информационных разрядов. Установлено, что существует ограниченное число модульно-взвешенных кодов с суммированием для данного значения длины информационного вектора, обозначены условия построения помехоустойчивых модульных кодов с суммированием. Подробно проанализированы ключевые свойства разработанных кодов с суммированием по обнаружению ошибок в информационных векторах. Приводится детальное сравнение характеристик новых кодов с характеристиками известных модульных кодов – модульных и модульно-модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов и модульных кодов с суммированием взвешенных переходов. Представлены основные преимущества и недостатки модифицированных модульных кодов с суммированием взвешенных информационных разрядов, а также классификация модульных кодов с суммированием по количеству контрольных разрядов.

обнаружение ошибок; диагностика; код Бергера; код Боуза – Лина; модульный код с суммированием; взвешенный код с суммированием; взвешивание разрядов; взвешивание переходов; натуральный ряд чисел

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-113-138.

## Введение

При разработке надежных дискретных систем автоматики и управления повсеместно используются методы помехоустойчивого кодирования [1–4]. Например, при синтезе аппаратных средств диагностирования применяются коды с малой избыточностью, ориентированные на обнаружение ошибок в информационных векторах [5, 6]. К таким кодам относятся равновесные неразделимые коды и разделимые коды с суммированием [7, 8].

Классический код с суммированием, или код Бергера ( $S(m,k)$ -код, где  $m$  и  $k$  – длины информационных и контрольных векторов соответственно), строится следующим образом. Определяется сумма единичных информационных разрядов (вес информационного вектора), а затем полученное число в двоичном представлении записывается в разряды контрольного вектора. Избыточность  $S(m,k)$ -кода определяется величиной  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ .

Коды Бергера имеют важную особенность, которая определяет их частое использование при построении дискретных систем: ими обнаруживаются любые монотонные ошибки (при таких ошибках искажаются либо единичные, либо нулевые разряды) [7]. К необнаруживаемым  $S(m,k)$ -кодом ошибкам относятся все ошибки, содержащие группу искажений  $\{0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0\}$  (все симметричные ошибки), что, например, составляет 50 % двукратных и 37,5 % четырехкратных ошибок в информационных векторах [9–11].

$S(m,k)$ -кодами неэффективно используются разряды контрольных векторов: так, все контрольные векторы формируются только в частном случае  $m = 2^p - 1$ ,  $p = 2, 3, \dots$ , а сами информационные векторы распределены между контрольными векторами крайне неравномерно. По этой причине существуют трудности применения  $S(m,k)$ -кодов при построении устройств, наделяемых свойством самопроверяемости компонентов [5].

Для уменьшения структурной избыточности систем автоматики и управления, а также для упрощения обеспечения свойства самопроверяемости элементов аппаратной реализации применяют коды с уменьшенным по сравнению с кодами Бергера количеством контрольных разрядов. Такие коды строятся путем подсчета веса информационного вектора и последующим определением наименьшего неотрицательного вычета полученного числа по заранее установленному модулю  $M$ . Они относятся к классу модульных кодов с суммированием, или  $SM(m,k)$ -кодов. Наиболее известными  $SM(m,k)$ -кодами являются коды паритета ( $S2(m,k)$ -коды) и коды Боуза – Лина ( $S4(m,k)$  и  $S8(m,k)$ -коды) [12–17].

Подобно кодам Бергера, модульные коды с суммированием не обнаруживают любые симметричные ошибки, а также все монотонные ошибки с кратностью  $d = jM$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ ,  $p \leq \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor$ . Кроме того,  $SM(m,k)$ -коды не обнаруживают некоторую долю асимметричных ошибок (такие ошибки происходят при искажении и нулевых и единичных разрядов в информа-

ционном векторе, но при неравном их количестве [18]) кратностью  $d = M + 2j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ ,  $d \leq m$  [19]. Модульные коды с суммированием, в отличие от кодов Бергера, имеют более равномерное распределение информационных векторов между контрольными векторами, контрольное оборудование для них гораздо проще и легче обеспечить его самопроверяемость [20]. Однако ценой таких свойств  $SM(m,k)$ -кодов является ухудшение характеристик обнаружения ошибок по сравнению с  $S(m,k)$ -кодами.

В [21] показан алгоритм модификации классических и модульных кодов с суммированием, основанный на определении наименьшего неотрицательного вычета веса информационного вектора и подсчете специального поправочного коэффициента для коррекции свойств обнаружения ошибок кодом. Такие коды обозначены как  $RS(m,k)$ - и  $RSM(m,k)$ -коды.  $RS(m,k)$ -код – это модифицированный код Бергера (у него такая же избыточность, как и у  $S(m,k)$ -кода).  $RSM(m,k)$ -код – это модифицированный модульный код с суммированием с избыточностью  $k = 1 + \log_2 M$ . Свойства модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов подробно представлены в [22]. В частности, показано, что код с максимально эффективным использованием контрольных разрядов может быть построен только при  $M = 2$ . Остальные способы построения  $RS(m,k)$  и  $RSM(m,k)$ -кодов дают коды с неравномерным распределением информационных векторов между всеми контрольными векторами, для некоторых кодов используются не все контрольные векторы, что усложняет задачу обеспечения самопроверяемости дискретных устройств.

Код с суммированием с аналогичной коду Бергера избыточностью может быть построен при установлении неравноправия между разрядами информационного вектора путем приписывания весовых коэффициентов самим разрядам или переходам между ними [23–26]. При построении таких кодов разрядам (или переходам между разрядами, занимающими соседние позиции в информационных векторах) приписываются специальные весовые коэффициенты – числа из натурального ряда. Затем определяется наименьший неотрицательный вычет суммарного веса единичных разрядов (или активных переходов) по модулю  $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ , а полученное число представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора. Таким образом строятся модульные коды с суммированием взвешенных разрядов и взвешенных переходов ( $WSM(m,k)$ - и  $WTM(m,k)$ -коды) [27].

В [19] доказывается, что только на основе взвешивания разрядов последовательностью весовых коэффициентов из натурального ряда чисел невозможно построить класс модульных кодов со значением  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$ . Коды с суммированием с постоянным значением числа контрольных разрядов вне зависимости от длины информационного

вектора могут быть построены на основе взвешивания переходов между разрядами, занимающими соседние позиции в информационном векторе. При этом, однако, существует ограничение:  $WTM(m,k)$ -код со значением модуля  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  будет помехоустойчивым в том случае,

если  $m \neq jM + 1, j \in \{1, 2, \dots, p\}, p = \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor$ . К примеру, коды  $WT4(5,2),$

$WT4(9,2), WT4(13,2)$  и прочие не будут являться помехоустойчивыми (в классе необнаруживаемых будут присутствовать одиночные ошибки).

В данной статье опишем способ построения целого семейства *помехоустойчивых модульно-взвешенных кодов с суммированием*, обладающих таким важным свойством, как равномерность распределения информационных векторов между всеми  $2^k$  контрольными векторами (такое свойство дает минимальное общее количество необнаруживаемых кодом ошибок и накладывает меньшие ограничения при обеспечении свойства самопроверяемости дискретного устройства).

## 1. Модульно-взвешенные коды с суммированием

Используя базовый алгоритм модификации [21] и устанавливая неравноправие между разрядами информационного вектора путем их взвешивания, можно строить семейства помехоустойчивых модульно-взвешенных кодов с суммированием ( $RWSM(m,k)$ -кодов). Такие коды будут иметь постоянное количество разрядов в контрольных векторах, не зависящее от длины информационного вектора и определяемое только значением модуля  $M$ .

**Алгоритм.** Правила вычисления разрядов контрольных векторов модульно взвешенных кодов с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел:

1. Устанавливается последовательность весовых коэффициентов разрядов информационного вектора, образующая натуральный ряд чисел начиная с младшего разряда:  $[w_m; w_{m-1}; \dots; w_2; w_1] = [m; m-1; \dots; 2; 1]$ .

2. Фиксируется значение модуля  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$ .

3. Подсчитывается сумма весовых коэффициентов единичных информационных разрядов – число  $W$ :

$$W = \sum_{i=1}^m w_i f_i. \quad (1)$$

4. Определяется наименьший неотрицательный вычет числа  $W$  по выбранному модулю  $M$ :  $W_M = W \pmod{M}$ .

5. Подсчитывается поправочный коэффициент  $\alpha$ , равный сумме по модулю два (*XOR*) произвольного (но заранее установленного) числа любых информационных разрядов.

6. Формируется число

$$V = W_M + \alpha M. \quad (2)$$

7. Полученное число  $V$  представляется в двоичном виде и записывается в контрольный вектор.

Следует отметить, что описываемый класс  $RWSM(m,k)$ -кодов дает частные случаи модифицированных взвешенных кодов, подробно описанные в [28].

В табл. 1 приводятся все кодовые слова  $RWS2(4,2)$ -кода, для которого поправочный коэффициент вычислен по формуле  $\alpha = f_2 \oplus f_4$ . Следует отметить, что это только один из вариантов построения модульно взвешенного кода с суммированием. Изменение значения модуля и правил формирования поправочного коэффициента  $\alpha$  позволяют строить разные  $RWSM(m,k)$ -коды с различными характеристиками обнаружения ошибок в информационных векторах.

Таблица 1. Кодовые слова  $RWS2(4,2)$ -кода с  $\alpha = f_2 \oplus f_4$

№	Информационный вектор				$W$	$W_M$	$\alpha$	$V$	Контрольный вектор	
	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$					$g_2$	$g_1$
	$w_1 = 4$	$w_3 = 3$	$w_2 = 2$	$w_1 = 1$						
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
2	0	0	1	0	2	0	1	2	1	0
3	0	0	1	1	3	1	1	3	1	1
4	0	1	0	0	3	1	0	1	0	1
5	0	1	0	1	4	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	5	1	1	3	1	1
7	0	1	1	1	6	0	1	2	1	0
8	1	0	0	0	4	0	1	2	1	0
9	1	0	0	1	5	1	1	3	1	1
10	1	0	1	0	6	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	7	1	0	1	0	1
12	1	1	0	0	7	1	1	3	1	1
13	1	1	0	1	8	0	1	2	1	0
14	1	1	1	0	9	1	0	1	0	1
15	1	1	1	1	10	0	0	0	0	0

Вообще, в качестве модуля  $M$  может выступать любое натуральное число из множества  $M \in \{2; 3; \dots; (W_{\max} + 1)\}$ , где  $W_{\max} = w_1 + w_2 + \dots + w_{m-1} + w_m$ .

Однако наилучшими с точки зрения схемотехнической реализации и характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах будут  $RWSM(m,k)$ -коды, для которых значение модуля выбирается из множества  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil - 1}\}$  [15].

$RWSM(m,k)$ -коды, строящиеся по приведенному алгоритму, обладают важной особенностью – все они имеют минимальное общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах при соответствующих значениях  $m$  и  $k$ . Такие коды имеют равномерное распределение информационных векторов между всеми контрольными векторами. Например, такое распределение показано в табл. 2 для  $RWS2(4,2)$ -кода с  $\alpha = f_2 \oplus f_4$ . Общее количество необнаруживаемых  $RWSM(m,k)$ -кодом ошибок может быть определено по формуле

$$N_{m,k} = 2^m (2^{m-k} - 1). \quad (3)$$

**Таблица 2.** Контрольные группы  $RWS2(4,2)$ -кода с  $\alpha = f_2 \oplus f_4$

Контрольные группы, $V$			
0	1	2	3
Контрольные векторы			
00	01	10	11
Информационные векторы			
0000	0001	0010	0011
0101	0100	0111	0110
1010	1011	1000	1001
1111	1110	1101	1100

К примеру, для рассматриваемого кода формула (3) дает следующий результат:  $N_{4,2} = 2^4 (2^{4-2} - 1) = 16 \cdot 3 = 48$ . Однако при различных способах подсчета поправочного коэффициента  $\alpha$  будут наблюдаться различные распределения информационных векторов между контрольными векторами, что будет определять и различные распределения необнаруживаемых ошибок по видам (монотонная, симметричная или асимметричная ошибка [18]) и по кратностям  $d$ .

Поскольку поправочный коэффициент может быть подсчитан как сумма по модулю два произвольного количества разрядов информационного вектора, существует следующее количество способов построения  $RWSM(m,k)$ -кода для данного значения длины информационного вектора:

$$N_{codes} = \sum_{t=0}^m C_m^t = 2^m. \quad (4)$$

Однако не все  $RWSM(m,k)$ -коды будут помехоустойчивыми (это следует из алгоритма построения кода).

**Теорема 1.**  $RWSM(m,k)$ -код будет помехоустойчивым в том и только том случае, если поправочный коэффициент будет вычисляться по формуле

$$\alpha = \bigoplus_{i \in D} f_i, \quad D = \left\{ M, 2M, \dots, \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor \cdot M \right\}. \quad (5)$$

**Доказательство.** Справедливость положения теоремы 1 объясняется следующими соображениями. При вычислении значения наименьшего неотрицательного вычета суммарного веса информационного вектора по модулю  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  значения разрядов, номера позиций которых в информационных векторах кратны значению модуля, перестают учитываться (не контролируются). При последующей модификации для исключения однократных обнаруживаемых ошибок требуется контролировать значения неучтенных разрядов. Коэффициент  $\alpha$  при  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  будет определять значение старшего разряда контрольного вектора  $RWSM(m,k)$ -кода. Таким образом, для «наделения» кода свойством помехоустойчивости необходимо суммировать по модулю два значения разрядов, номера позиций которых в информационном векторе кратны значению  $M$ , а также любые другие информационные разряды.

Доказательство завершено.

Из теоремы 1 непосредственно следует такое положение.

**Теорема 2.** Мощность множества помехоустойчивых  $RWSM(m,k)$ -кодов определяется величиной

$$N_{codes}^{ED} = 2^{m - \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor}. \quad (6)$$

**Доказательство.** Величина  $\left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor$  определяет количество разрядов информационного вектора, которые перестают контролироваться на этапе определения наименьшего неотрицательного вычета суммарного веса информационного вектора. Их все необходимо контролировать в старшем разряде контрольного вектора при вычислении поправочного коэффициента  $\alpha$ . Общее количество разрядов информационного вектора равно  $m$ . Тогда оставшиеся  $m - \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor$  разрядов информационного вектора могут входить

в сумму поправочного коэффициента, а могут и не входить. Количество способов вычисления поправочного коэффициента, таким образом, определяется величиной  $2^{m - \lfloor \frac{m}{M} \rfloor}$ . Отсюда следует справедливость положения теоремы 2, что и требовалось доказать.

Теорема 1 определяет условия построения помехоустойчивого модульно взвешенного кода с суммированием, а теорема 2 – количество таких кодов. Так, при  $m = 4$  и значении модуля  $M = 2$  может быть построено  $2^{4 - \lfloor \frac{4}{2} \rfloor} = 4$  различных помехоустойчивых  $RWS2(4,2)$ -кода. В табл. 3 представлены характеристики обнаружения ошибок различными  $RWS2(4,2)$ -кодами.

Для каждого  $RWS2(4,2)$ -кода приведен способ подсчета поправочного коэффициента  $\alpha$ . В первой графе таблицы указан десятичный эквивалент, соответствующий способу вычисления поправочного коэффициента  $\alpha$  (например, число 13 представляется в двоичном виде как  $\langle f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle = \langle 1101 \rangle$ , что означает использование при вычислении поправочного коэффициента формулы  $\alpha = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4$ ), а во второй – сама формула. В остальных графах таблицы представлены рассчитанные значения количества необнаруживаемых ошибок по кратностям и по видам. Для необнаруживаемых ошибок по кратностям в каждой клетке таблицы указаны: число сверху – общее количество необнаруживаемых ошибок данной кратностью, числа снизу – количество монотонных/симметричных/асимметричных необнаруживаемых ошибок.

## 2. Свойства модульно-взвешенных кодов с суммированием

На основе алгоритмов анализа табличной формы задания  $RWSM(m,k)$ -кодов реализован специальный программный модуль по расчету характеристик обнаружения ошибок данными кодами по видам и кратностям. В табл. 4 и 5 представлены характеристики обнаружения ошибок семействами  $RWS2(m,k)$ - и  $RWS4(m,k)$ -кодов при длинах информационных векторов  $m \leq 8$ .

Анализ свойств  $RWS2(m,k)$ - и  $RWS4(m,k)$ -кодов показал, что для конкретного значения длины информационного вектора существует ограниченное количество кодов с различными характеристиками обнаружения ошибок. Для обоих семейств кодов наблюдается следующая закономерность: с увеличением количества разрядов в информационном векторе в распределении необнаруживаемых ошибок уменьшается доля монотонных и увеличивается доля асимметричных ошибок. Для  $RWS2(m,k)$ -кодов со значением  $m \geq 4$  и для  $RWS4(m,k)$ -кодов со значением  $m \geq 5$  может быть подобран такой способ подсчета поправочного коэффициента  $\alpha$ , который даст код со смещением распределения необнаруживаемых ошибок по кратностям в сторону «средних» кратностей (значений кратностей, близких к половинному значению длины информационного вектора).

Таблица 3. Характеристики обнаружения ошибок семейством  $RWS(4,2)$ -кодов

Десятичный эквивалент формулы вычисления поправочного коэффициента $\alpha$	Формула вычисления поправочного коэффициента $\alpha$	всех видов	Общее количество необнаруживаемых ошибок по видам				Общее количество необнаруживаемых ошибок по кратностям						
			одиночные	монотонные	симметричные	асимметричные	1	2	3	4			
0	$\alpha = 0$	112	32	26	22	32	32	32	32	32	32	32	16
1	$\alpha = f_1$	48	32	8	8	0	32	8/8/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0
2	$\alpha = f_2$	48	16	12	8	12	16	8/8/0	4/0/12	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0
3	$\alpha = f_1 \oplus f_2$	48	16	6	6	20	16	0	4/0/12	16	16	16	16
4	$\alpha = f_3$	48	32	8	8	0	32	16	0	0	0	0	0
5	$\alpha = f_1 \oplus f_3$	112	32	26	22	32	32	8/8/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
6	$\alpha = f_2 \oplus f_3$	48	16	6	6	20	16	0	4/0/12	16	16	16	16
7	$\alpha = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3$	48	16	12	8	12	16	8/8/0	4/0/12	16	16	16	0
8	$\alpha = f_4$	48	16	12	8	12	16	8/8/0	4/0/12	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
9	$\alpha = f_1 \oplus f_4$	48	16	6	6	20	16	0	4/0/12	16	16	16	16
10	$\alpha = f_2 \oplus f_4$	48	0	18	22	8	0	32	0	0	0	0	0
11	$\alpha = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4$	48	0	16	8	24	0	16	0/0/0	8/8/0	8/0/24	0/0/0	0/0/0
12	$\alpha = f_3 \oplus f_4$	48	16	6	6	20	16	0	4/0/12	16	16	16	16
13	$\alpha = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4$	48	16	12	8	12	16	0	0/0/0	0/0/0	4/0/12	0/0/0	0
14	$\alpha = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4$	48	0	16	8	24	0	16	0	0	32	0	0
15	$\alpha = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3 \oplus f_4$	48	0	18	22	8	0	32	0	0	0	0	0

Таблица 4. Характеристики обнаружения ошибок семействам  $RWS2(m,k)$ -кодов

$m$	Способ подсчета поправочного коэффициента	Общее количество необнаруживаемых ошибок	Распределение необнаруживаемых ошибок по видам, %			Распределение необнаруживаемых ошибок по кратностям, %										
			монотонные	симметричные	асимметричные	2	3	4	5	6	7	8				
3	2, 7	8	50	50	0	100	0									
	3, 6	8	25	0	75	0	100									
4	10, 15	48	37,5	45,83	16,67	66,67	0	33,33								
	11, 14	48	33,33	16,67	50	33,33	66,67	0								
5	10, 31	224	33,93	44,64	21,43	57,14	0	42,86	0							
	11, 14, 15, 26, 27, 30	224	30,36	19,64	50	28,57	57,14	14,29	0							
6	42, 63	960	27,5	42,5	30	40	0	60	0							
	43, 46, 47, 58, 59, 62	960	26,67	20,83	52,5	26,67	40	20	13,33	0						
7	42, 127	3968	22,48	40,52	37	29,03	0	61,29	0	9,68	0					
	43, 46, 58, 63, 106, 111, 123, 126	3968	21,82	20,57	57,61	19,35	29,03	29,03	19,35	0	3,24					
8	47, 59, 62, 107, 110, 122	3968	21,67	19,56	58,77	16,13	38,71	22,58	12,9	9,68	0					
	170, 255	16 128	17,67	38,53	43,8	19,05	0	60,31	0	19,05	0	1,59				
8	171, 174, 186, 191, 234, 239, 251, 254	16 128	17,51	19,94	62,55	14,29	19,05	30,15	25,4	4,76	6,35	0				
	175, 187, 190, 235, 238, 250	16 128	17,47	19,09	63,44	12,7	25,4	22,21	25,4	12,7	0	1,59				

Таблица 5. Характеристики обнаружения ошибок семействам  $RWS4(m,k)$ -кодов

$m$	Способ подсчета поправочного коэффициента	Общее количество необнаруживаемых ошибок	Распределение необнаруживаемых ошибок по видам, %			Распределение необнаруживаемых ошибок по кратностям, %											
			монотонные	симметричные	асимметричные	2	3	4	5	6	7	8					
4	8, 13	16	50	0	50	50	50	0									
	9, 12	16	25	25	50	0	50	50									
	10, 15	16	50	25	25	50	0	50									
	11, 14	16	25	0	75	0	100	0									
5	8, 29	96	41,67	16,66	41,67	50	50	0									
	9, 13, 24, 28	96	29,17	12,5	58,33	16,67	50	33,33	0								
	10, 31	96	37,5	37,5	25	50	0	50	0								
	11, 15, 26, 30	96	33,33	8,34	58,33	16,67	66,66	16,67	0								
	12, 25	96	25	33,33	41,67	16,67	50	33,33	0								
	14, 27	96	20,83	20,84	58,33	16,67	66,66	16,67	0								
6	8, 29	448	32,14	21,43	46,43	35,71	42,86	21,43	0								
	9, 13, 24, 28	448	24,11	19,64	56,25	21,43	28,57	35,71	14,29								
	10, 31, 40, 61	448	25	16,07	58,93	21,43	35,71	21,43	21,43	0							
	11, 15, 26, 30, 41, 45, 56, 60	448	22,32	14,29	63,39	7,14	50	35,72	7,14	0							
	12, 25	448	23,22	32,14	44,64	21,43	28,57	35,71	14,29	0							
	14, 27, 44, 57	448	19,64	19,64	60,72	7,14	50	35,72	7,14	0							
	42, 63	448	28,57	39,29	32,14	35,71	0	64,29	0	0							
	43, 47, 58, 62	448	27,68	16,07	56,25	21,43	42,85	21,43	14,29	0							
46, 59	448	19,64	21,43	58,93	21,43	42,85	21,43	14,29	0								

Окончание табл. 5

m	Способ подсчета поправочного коэффициента	Общее количество необнаруживаемых ошибок	Распределение необнаруживаемых ошибок по видам, %			Распределение необнаруживаемых ошибок по кратностям, %								
			монотонные	симметричные	асимметричные	2	3	4	5	6	7	8		
7	8, 93	1920	27,71	20,42	51,87	26,67	40	23,33	6,67	3,33	0			
	9, 12, 24, 29, 43, 46, 72, 77, 89, 92, 106, 111, 123, 126	1920	21,35	20	58,65	16,67	30	30	13,33	6,67	3,33			
	10, 40, 95, 125	1920	22,61	18,33	59,06	20	26,68	23,33	23,33	3,33	3,33			
	11, 14, 26, 31, 41, 44, 56, 61, 74, 79, 91, 94, 104, 109, 121, 124	1920	19,79	17,08	63,13	10	36,67	30	16,66	6,67	0			
	13, 28, 73, 88	1920	20,21	18,75	61,04	13,33	26,67	36,67	20	3,33	0			
	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120	1920	20,1	16,67	63,23	6,67	40	36,67	10	3,33	3,33			
	25, 76	1920	19,37	30,42	50,21	13,33	26,67	36,67	20	3,33	0			
	27, 57, 78, 108	1920	17,6	21,67	60,73	6,67	40	36,67	10	3,33	3,33			
	42, 127	1920	24,38	38,75	36,87	26,67	0	63,33	0	10	0			
	47, 62, 107, 122	1920	23,54	17,08	59,38	13,33	40	23,34	13,33	10	0			
8	59, 110	1920	16,04	22,08	61,88	13,33	40	23,34	13,33	10	0			
	143, 158, 173, 188, 203, 218, 233, 248	7936	16,53	17,54	65,93	6,45	29,03	30,65	17,74	11,29	4,84	0		
	155, 185, 206, 236	7936	15,93	20,36	63,71	6,45	29,03	30,65	17,74	11,29	4,84	0		
	139, 142, 154, 159, 169, 172, 184, 189, 202, 207, 219, 222, 232, 237, 249, 252	7936	16,45	17,82	65,73	8,06	25,82	29,03	24,19	9,68	1,61	1,61		
	141, 156, 201, 216	7936	16,56	19,43	64,01	9,68	19,35	37,1	22,58	6,45	3,23	1,61		
	153, 204	7936	16,36	27,89	55,75	9,68	19,35	37,1	22,58	6,45	3,23	1,61		
	175, 190, 235, 250	7936	17,36	17,82	64,82	9,68	25,81	24,19	25,81	12,9	0	1,61		
	187, 238	7936	15,55	19,83	64,62	9,68	25,81	24,19	25,81	12,9	0	1,61		
	137, 140, 152, 157, 200, 205, 217, 220	7936	16,83	20,37	62,8	11,29	19,35	32,26	22,58	11,29	3,23	0		
	171, 174, 186, 191, 234, 239, 251, 254	7936	16,83	18,75	64,42	11,29	19,35	32,26	25,81	4,84	6,45	0		
138, 168, 223, 253	7936	17,14	18,75	64,11	12,9	16,12	30,65	30,65	4,84	4,84	0			
136, 221	7936	18,38	19,83	61,79	16,13	19,35	24,19	22,59	12,9	3,23	1,61			
170, 255	7936	17,56	37,58	44,86	16,13	0	62,91	0	19,35	0	1,61			

В табл. 6 и 7 для сравнения приведены подробные характеристики обнаружения ошибок различными модульными кодами с суммированием с двумя и тремя контрольными разрядами для значения  $m = 8$ . Для каждого кода даны распределения ошибок по кратностям и видам (смысл обозначений тот же, что и в табл. 3).

Сравнивая между собой отдельно группы кодов  $\{S4(m,k), RS2(m,k), WT4(m,k), RWS2(m,k)\}$  и  $\{S8(m,k), RS4(m,k), WT8(m,k), RWS4(m,k)\}$ , отмечаем следующие закономерности:

– коды  $RS2(m,k)$ ,  $WT4(m,k)$ ,  $RWS2(m,k)$ ,  $WT8(m,k)$  и  $RWS4(m,k)$  принадлежат к типу кодов с наименьшим общим количеством необнаруживаемых ошибок при фиксированных значениях  $m$  и  $k$ ;

– наилучшими по обнаружению монотонных и асимметричных ошибок в информационных векторах как в общем, так и в области малой кратности ошибок являются  $S4(m,k)$ - и  $S8(m,k)$ -коды;

– коды  $RWS2(m,k)$  и  $RWS4(m,k)$  имеют наименьшее количество необнаруживаемых двукратных ошибок среди всех модульных кодов с суммированием с аналогичным количеством контрольных разрядов;

– в отличие от сравниваемых модульных кодов\*,  $RWS2(m,k)$  и  $RWS4(m,k)$  имеют в классе необнаруживаемых ошибки как четных, так и нечетных кратностей (исключения составляют случаи, когда поправочный коэффициент при построении кода выбирается как свертка по модулю два всех разрядов информационного вектора или всех разрядов, занимающих четные позиции в информационном векторе).

Таким образом, могут быть выявлены преимущества и недостатки модифицированных модульно-взвешенных кодов с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел. Кроме того, на основании преимуществ можно сделать выводы о практической направленности данного класса кодов. Наибольшим преимуществом  $RWSM(m,k)$ -кодов перед всеми остальными кодами является возможность идентификации наибольшего количества двукратных ошибок. Именно ошибки малых кратностей, по статистике, наиболее часто вызываются неисправностями в технических объектах. Например, в [29] приводятся статистические данные о распределениях ошибок на выходах контрольных комбинационных схем. Несомненным и весомым недостатком  $RWSM(m,k)$ -кодов является высокий процент необнаруживаемых монотонных ошибок в информационных векторах, в том числе в области малой их кратности. Это обстоятельство не дает возможности применения класса  $RWSM(m,k)$ -кодов, допустим, при известных «монотонных реализациях» логических устройств [30–36]. Требуется разработка новых подходов к приложению данных кодов с учетом свойств топологии объекта диагностирования.

\* Из [19, 27] известно, что для класса модульных кодов с суммированием взвешенных переходов при четных значениях длин информационных векторов в классе необнаруживаемых присутствуют ошибки только четной кратностью, а при нечетных значениях длин информационных векторов – как четных, так и нечетных кратностей.

Таблица 6. Характеристики обнаружения ошибок модульными кодами с двумя контрольными разрядами

Код	Способ подсчета поправочного коэффициента	Распределение ошибок по кратностям и видам								Всего ошибок
		2	3	4	5	6	7	8		
S4(8,2)	-	3584	0	8960	0	3584	0	128	16 256	
		0/3584/0		2240/6720/0		0/2240/1344		2/70/56	2242/12 614/1400	
		5376	0	8960	0	1792	0	0	16 128	
RS2(8,2)	Все варианты с 1-ми и 7-ми разрядами	2688/2688/0	0	1120/3360/4480	0	56/560/1176	0	0	3864/6608/5656	
		4096	0	7680	0	4096	0	256	16 128	
		2048/2048/0	0	960/2880/3840	0	128/1280/688	0	2/70/184	3138/6278/6712	
		3328	0	8960	0	3840	0	0	16 128	
		1664/1664/0	0	1120/3360/4480	0	120/1200/2520	0	0	2904/6224/7000	
WT4(8,2)	-	3072	0	9728	0	3072	0	256	16 128	
		1536/1536/0	0	1216/3648/4864	0	96/960/2016	0	2/70/184	2850/6214/7064	
		3072	0	9728	0	3072	0	256	16 128	
		1536/1536/0	0	1216/3648/4864	0	96/960/2016	0	2/70/184	2850/6214/7064	
		2048	4096	3584	4096	2048	0	256	16128	
RWS2(8,2)	175, 187, 190, 235, 238, 250	1024/1024/0	1024/0/3072	448/1344/1792	256/0/3840	64/640/1344	0	2/70/184	2818/3078/10 232	
		2304	3072	4864	4096	768	1024	0	16 128	
		1152/1152/0	768/0/2304	608/1824/2432	256/0/3840	24/240/504	16/0/1008	0	2824/3216/10 088	
		3072	0	9728	0	3072	0	256	16 128	
		1536/1536/0	0	1216/3648/4864	0	96/960/2016	0	2/70/184	2850/6214/7064	

Таблица 7. Характеристики обнаружения ошибок модульными кодами с тремя контрольными разрядами

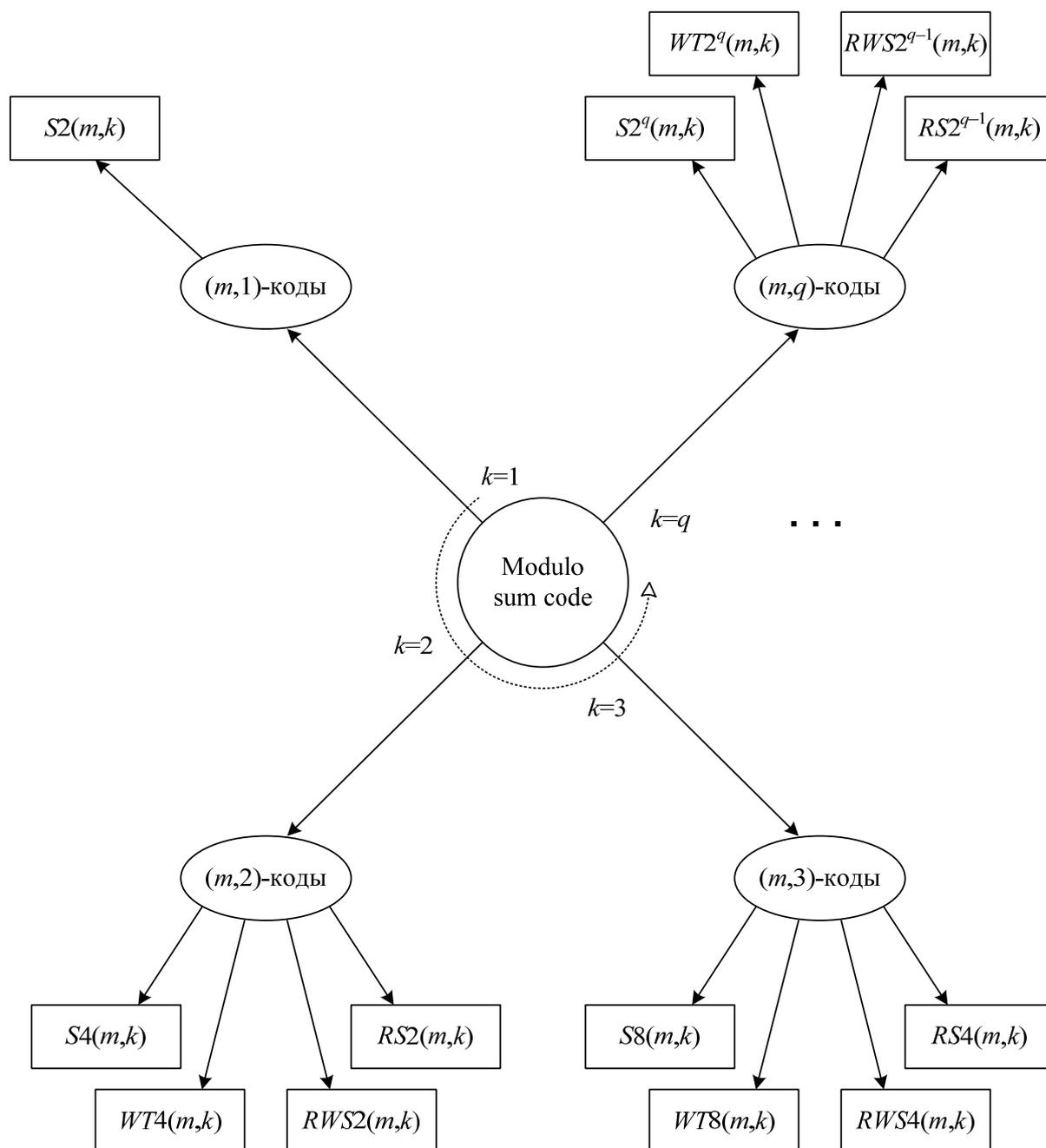
Код	Способ подсчета поправочного коэффициента	Распределение ошибок по кратностям и видам								Всего ошибок
		2	3	4	5	6	7	8		
S8(8,3)	-	3584	0	6720		2240		72	12616	
		0/3584/0	0/6720/0	4480	0	0/2240/0	0	2/70/0	2/12 614/0	
RS4(8,3)	Все варианты с 1-ми и 7-ми разрядами	2688	0	4480	0	896		0	8064	
		0/2688/0	0/1120/3360/0	1120/3360/0	0	0/560/336	0	0	1120/6608/336	
		2048	0	3840	0	2048		128	8064	
	Все варианты с 2-ми и 6-ми разрядами	0/2048/0	0	960/2880/0	0	0/1280/768		2/70/56	962/6278/824	
		1664	0	4480	0	1920		0	8064	
		0/1664/0	0	1120/3360/0	0	0/1200/720		0	1120/6224/720	
Все варианты с 3-ми и 5-ми разрядами	1536	0	4864	0	1536		128	8064		
	0/1536/0	0	1216/3648/0	0	0/960/576		2/70/56	1218/6214/632		
WT8(8,3)	-	1792	0	4096	0	1792		256	7936	
		1024/768/0	0	592/1520/1984	0	40/624/1128		2/70/184	1658/2982/3296	

Окончание табл. 7

Код	Способ подсчета поправочного коэффициента	Распределение ошибок по кратностям и видам								Всего ошибок
		2	3	4	5	6	7	8		
RWS4(8,3)	143, 158, 173, 188, 203, 218, 233, 248	512	2304	2432	1408	896	384	0	7936	
		384/128/0	512/0/1792	288/992/1152	96/0/1312	24/272/600	8/0/376	0	1312/1392/5232	
	155, 185, 206, 236	512	2304	2432	1408	896	384	0	7936	
		128/384/0	768/0/1536	288/992/1152	32/0/1376	40/240/616	8/0/376	0	1264/1616/5056	
	139, 142, 154, 159, 169, 172, 184, 189, 202, 207, 219, 222, 232, 237, 249, 252	640	2048	2304	1920	768	128	128	7936	
		384/256/0	512/0/1536	256/896/1152	128/0/1792	24/224/520	0/0/128	2/38/88	1306/1414/5216	
	141, 156, 201, 216	768	1536	2944	1792	512	256	128	7936	
		512/256/0	256/0/1280	448/1088/1408	64/0/1728	32/160/320	0/0/256	2/38/88	1314/1542/5080	
	153, 204	768	1536	2944	1792	512	256	128	7936	
		256/512/0	768/0/768	64/1472/1408	192/0/1600	16/192/304	0/0/256	2/38/88	1298/2214/4424	
	175, 190, 235, 250	768	2048	1920	2048	1024	0	128	7936	
		512/256/0	512/0/1536	192/832/896	128/0/1920	32/288/704	0	2/38/88	1378/1414/5144	
	187, 238	768	2048	1920	2048	1024	0	128	7936	
		256/512/0	512/0/1536	320/704/896	128/0/1920	16/320/688	0	2/38/88	1234/1574/5128	
	137, 140, 152, 157, 200, 205, 217, 220	896	1536	2560	1792	896	256	0	7936	
	512/384/0	384/0/1152	288/992/1280	128/0/1664	16/240/640	8/0/248	0	1336/1616/4984		
171, 174, 186, 191, 234, 239, 251, 254	896	1536	2560	2048	384	512	0	7936		
	512/384/0	384/0/1152	288/992/1280	128/0/1920	16/112/256	8/0/504	0	1336/1388/5112		
138, 168, 223, 253	1024	1280	2432	2432	384	384	0	7936		
	640/384/0	256/0/1024	288/992/1152	160/0/2272	8/112/264	8/0/376	0	1360/1488/5088		
136, 221	1280	1536	1920	1792	1024	256	128	7936		
	768/512/0	256/0/1280	320/704/896	64/0/1728	48/320/656	0/0/256	2/38/88	1458/1574/4904		
170, 255	1280	0	4992	0	1536	0	128	7936		
	768/512/0		576/1984/2432		48/448/1040		2/38/88	1394/2982/3560		

### 3. Классификация модульных кодов с суммированием

На рисунке изображена классификация  $(m,k)$ -кодов, в которой указаны типы кодов и сделано разбиение их по количеству контрольных разрядов: от  $k = 1$  до  $k = q$  ( $q$  – некоторое натуральное число).



Классификация модульных кодов с суммированием

При  $k = 1$  существует единственный код с суммированием – код паритета. Увеличение числа контрольных разрядов позволяет увеличить и количество способов построения  $(m, k)$ -кодов: при  $k \geq 2$  возможно построение  $SM(m, k)$ -,  $WTM(m, k)$ -,  $RSM(m, k)$ - и  $RWSM(m, k)$ -кодов.  $SM(m, k)$ - и  $WTM(m, k)$ -коды строятся единственным способом для заданной длины информационного вектора, тогда как множество семейств  $RSM(m, k)$ - и  $RWSM(m, k)$ -кодов с заданным значением  $m$  гораздо шире и определяется количеством вариантов вычисления поправочного коэффициента при модификации: для  $RSM(m, k)$ -кодов это число равно  $2^m - 2$ , а для  $RWSM(m, k)$ -кодов –  $2^{m - \lfloor \frac{m}{M} \rfloor}$ . Следует также отметить, что  $S2(m, k)$ ,  $RS2(m, k)$  и все помехоустойчивые  $RWSM(m, k)$ -коды имеют наименьшее общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных векторах при соответствующих соотношениях длин информационных и контрольных векторов.  $WTM(m, k)$ -коды со значениями модуля  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  будут обладать подобным свойством при выполнении условия  $m \geq \frac{M}{2} + 1$  [19]. Остальные же коды –  $SM(m, k)$  и  $RSM(m, k)$  – при  $M \geq 4$  имеют несколько большее количество ошибок в классе необнаруживаемых, чем коды с минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок.

## Заключение

Предложенный авторами ранее [28] принцип построения модифицированных кодов с суммированием на основе взвешивания разрядов весовыми коэффициентами из натурального ряда чисел может быть использован и при построении класса модифицированных кодов с суммированием взвешенных переходов со значениями модуля  $M \in \{2; 4; \dots; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  ( $RWSM(m, k)$ -кодов). При этом  $RWSM(m, k)$ -коды будут иметь вне зависимости от количества информационных разрядов постоянное значение числа контрольных разрядов, определяемое значением модуля:  $k = 1 + \log_2 M$ . Естественно, что  $RWSM(m, k)$ -коды будут обладать возможностью обнаружения меньшего количества ошибок в информационных векторах по сравнению с  $RWS(m, k)$ -кодами при одинаковых значениях длин информационных векторов. Но вносимая при реализации дискретной системы с использованием  $RWSM(m, k)$ -кода аппаратурная избыточность будет меньшей, чем при использовании  $RWS(m, k)$ -кода.

Необходимо указать на основную особенность  $RWSM(m, k)$ -кодов по сравнению с известными модульными кодами с суммированием единичных информационных разрядов. Помехоустойчивые  $RWSM(m, k)$ -коды об-

ладают минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок в информационных векторах при конкретных значениях длин информационных и контрольных векторов.  $SM(m,k)$  и  $RSM(m,k)$  при значениях  $M \geq 4$  к таковым не относятся. Следует, однако, отметить приоритет последних по обнаружению монотонных и асимметричных ошибок в информационных векторах. Эффект в уменьшении общего количества необнаруживаемых ошибок  $RWSM(m,k)$ -кодами достигается именно за счет снижения доли необнаруживаемых симметричных ошибок по сравнению с  $SM(m,k)$ - и  $RSM(m,k)$ -кодами.

$RWSM(m,k)$ -коды могут иметь различные сферы приложения, в том числе при организации диагностического обеспечения логических устройств. Например, в [37] анализируются характеристики структурной избыточности самопроверяемых схем встроенного контроля, синтезированных на основе  $RWSM(m,k)$ -кодов, при построении которых поправочный коэффициент вычислялся как  $\alpha = f_2 \oplus f_4 \oplus \dots \oplus f_m$ , если  $m$  – четное число, и  $\alpha = f_2 \oplus f_4 \oplus \dots \oplus f_{m-1}$ , если  $m$  – нечетное число (при таком способе построения код обнаруживает любые ошибки нечетных кратностей и сравним с классическими и модифицированными кодами Бергера [22]). Результаты экспериментов подтверждают эффективность приложения  $RWSM(m,k)$ -кодов при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля как по сравнению с дублированием, так и по сравнению с использованием известных кодов с суммированием.

Представленные в данной статье  $RWSM(m,k)$ -коды и установленные их особенности обнаружения ошибок в информационных векторах не ориентированы на какие-либо технологии изготовления дискретных устройств и систем, а также на какие-либо модели неисправностей. Это свидетельствует об универсальности полученных результатов и возможности использования  $RWSM(m,k)$ -кодов при организации высоконадежных дискретных систем на современной и только развиваемой в исследованиях элементной базе.

## Библиографический список

1. McCluskey E. J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits / E. J. McCluskey. – N. J. : Prentice Hall PTR, 1986. – 549 p.
2. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
3. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.
4. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима ; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского (ХАИ), 2012. – 614 с.

5. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 207 с.
6. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. – Pp. 985–994.
7. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
8. Freiman C. V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels / C. V. Freiman // Information and Control. – 1962. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 64–71.
9. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
10. Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Предельные свойства кода с суммированием // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 290–299.
11. Ефанов Д. В. Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля / Д. В. Ефанов // Информатика и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 77–86.
12. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.
13. Fujiwara E. A. Self-Testing Group-Parity Prediction Checker and Its Use for Built-in-Testing / E. Fujiwara, N. Muto, K. Matsuoka // IEEE Transaction on Computers. – 1984. – С. 33. – N 8. – Pp. 583–588.
14. Bose B. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes / B. Bose, D. J. Lin // IEEE Transaction on Computers. – Nov. 1985. – Vol. C-34. – Pp. 1026–1032.
15. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
16. Das D. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes / D. Das, N. A. Touba // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155.
17. Ghosh S. Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes / S. Ghosh, S. Basu, N. A. Touba // Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05), 2005. – Pp. 315–320.
18. Сапожников Вал. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343.
19. Сапожников Вал. В. Модульные коды с суммированием взвешенных переходов с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. Г. Котенко // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 1. – С. 137–164.
20. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
21. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.

22. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
23. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of 17th IEEE Test Symposium, USA, California, 1999. – Pp. 370–376.
24. Das D. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
25. Ghosh S. Scan Chain Fault Identification Using Weight-Based Codes for SoC Circuits / S. Ghosh, K. W. Lai, W. B. Jone, S. C. Chang // Proceedings of 13th Asian Test Symposium, 15–17 November 2004. – Pp. 210–215.
26. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 153–165.
27. Сапожников Вал. В. Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39. – № 4. – С. 69–88.
28. Сапожников Вал. В. Коды с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел, в системах функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39. – № 5. – С. 37–58.
29. Sapozhnikov Val. Method of Combinational Circuits Testing by Dividing its Outputs into Groups and Using Codes, that Effectively Detect Double Errors / Val. Sapozhnikov, D. Efanov, Vl. Sapozhnikov, V. Dmitriev // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 129–136.
30. Гессель М. Построение самотестируемых и самопроверяемых комбинационных устройств со слабозависимыми выходами / М. Гессель, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 8. – С. 150–160.
31. Sogomonyan E. S. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs / E. S. Sogomonyan, M. Gössel // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1993. – Vol. 4. – Issue 4. – Pp. 267–281.
32. Busaba F. Y. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1994. – Issue 1. – Pp. 19–28.
33. Saposhnikov Val. V. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits / Val. V. Saposhnikov, A. Morosov, Vl. V. Saposhnikov, M. Göessel // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 41–53.
34. Matrosova A. Yu. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 47–58.
35. Ostanin S. Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults / S. Ostanin // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 696–699.
36. Matrosova A. Pseudo-Exhaustive Testing of Sequential Circuits for Multiple Stuck-at Faults / A. Matrosova, E. Mitrofanov // Proceedings of 14th IEEE East-West Design &

- Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 533–536.
37. Ефанов Д. В. Модульно-модифицированные взвешенные коды с суммированием в эксперименте по организации систем функционального контроля тестовых комбинационных схем / Д. В. Ефанов, А. М. Костроминов, А. Д. Манаков, А. В. Макшапов, В. А. Шаров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т. 15. – № 2. – С. 311–322.

*Valery V. Sapozhnikov,  
Vladimir V. Sapozhnikov,*

«Automation and remote control on railways» department  
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

*Dmitry V. Efanov,*  
«Automation, remote control and communication on railway transport»  
Russian University of Transport

### **Modified modulo codes with weight-based bits summation with natural number sequence of weight indexes**

The methods for constructing binary codes with summation with low redundancy to solve the tasks of digital systems technical diagnostics are analyzed. It is proved that it is possible to construct a whole class of codes with summation with a constant number of check bits, which does not depend on a number of data bits in the codeword. The principles of constructing such codes are based on weighing bits of data vector by natural number sequence of weight indexes, starting with the lowest bit using the establishment of modulo in the form of degree of two and also calculation of special correction coefficients – modulo two convolutions of some part of data bits. It is determined in the article that there is a limited number of modulo weight-based codes with summation for this value of data vector length, also the conditions of the formation of error-tolerant modulo codes with summation are indicated. The paper contains a detailed analysis of the key properties of developed codes with summation concerning error detection in data vectors. A detailed comparison of the characteristics of the new codes (modulo and unit-modified codes with summation of one data bits) with the characteristics of the known modulo codes (modulo codes with summation of weighted transitions) is given. The main advantages and disadvantages of modified modulo codes with summation of weighted data bits are presented. The classification of modulo codes with summation by the number of check bits is given.

error detection; diagnostics; Berger code; Bose – Lin code; modular sum code; weighted-based sum code; weighing of the bits; weighing the transitions; natural number sequence

### **References**

1. McCluskey E. J. (1986). Logic Design Principles (with Emphasis on Testable Semi-custom Circuits). New Jersey, Prentice-Hall. – 549 p.
2. Fujiwara E. (2006). Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons. – 720 p.

3. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. (2008). *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V. – 184 p.
4. Drozd A. V., Harchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. (2012). *Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems [Rabochee diagnostirovanie bezopasnyh informatsionno-upravlyayushchih sistem]* ; Pod red. A. V. Drozd and V. S. Harchenko. Khar'kov, Natsionalnyj aerokosmicheskij universitet im. N. E. Zhukovskogo (KhAI). – 614 p.
5. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989). *Self-checking devices and fault-tolerant systems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]*. Moscow, Radio & Communication [Radio i svyaz']. – 208 p.
6. Mitra S., McCluskey E. J. (2000). *Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose?* Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994.
7. Berger J. M. (1961). *A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels*. Information and Control, vol. 4, issue 1. – Pp. 68–73.
8. Freiman C. V. (1962). *Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels*. Information and Control, vol. 5, issue 1. – Pp. 64–71.
9. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). *On Summation Code Properties in Functional Control Circuits [O svoystvah koda s summirovaniem v skhemah funktsionalnogo kontrolya]*. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.
10. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2010). *Sum code limit properties [Predel'nye svoystva koda s summirovaniem]*. Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 3. – Pp. 290–299.
11. Efanov D. V. (2013). *Three Theorems about Berger Codes in Builtin Control Circuits [Tri teoremy o kodah Bergera v skhemah vstroennogo kontrolya]*. Informational Science and Control Systems [Informatika i sistemy upravleniya], issue 1. – Pp. 77–86.
12. Aksyonova G. P. (1979). *Necessary and sufficient conditions for the design of totally checking circuits of compression by modulo 2 [Neobhodimye i dostatochnye usloviya postroeniya polnost'yu proveryaemyh skhem svertki po modulyu dva]*. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 9. – Pp. 126–135.
13. Fujiwara E., Muto N., Matsuoka K. (1984). *A Self-Testing Group-Parity Prediction Checker and Its Use for Built-in-Testing*. IEEE Transaction on Computers, vol. 33, N 8. – Pp. 583–588.
14. Bose B., Lin D. J. (1985). *Systematic Unidirectional Error-Detection Codes*. IEEE Transaction on Computers, vol. C-34, Nov. 1985. – Pp. 1026–1032.
15. Piestrak S. J. (1995). *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. – 111 p.
16. 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, issue 1–2. – Pp. 145–155.
17. Ghosh S., Basu S., Toubia N. A. (2005). *Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes*. Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05). – Pp. 315–320.
18. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). *Errors classification in information vectors of systematic codes [Klassifikatsiya oshibok v informatsionnyh]*

- vektorah sistematicheskikh kodov]. *Journal of Instrument Engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie]*, vol. 58, issue 5. – Pp. 333–343.
19. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Kotenko A. G. (2017). Modulo Codes with Summation of Weighted Transitions With Natural Number Sequence of Weights [Modul'nye kody s summirovaniem vzveshennykh perekhodov s posledovatel'nost'yu vesovykh koeffficientov, obrazuyushchej natural'nyj ryad chisel]. *SPIIRAS Proceedings [Trudy SPIIRAN]*, issue 1. – Pp. 137–164.
  20. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2015). Applications of Modular Summation Codes to Concurrent Error Detection Systems for Combinational Boolean Circuits [Primenenie modul'nykh kodov s summirovaniem dlya postroeniya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem]. *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*, issue 10. – Pp. 152–169.
  21. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2012). Formation Berger modified code with minimum total number of undetectable errors in data bits [Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nyim chislom neobnaruzhivaemykh oshibok informatsionnykh razryadov]. *Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie]*, vol. 34, issue 6. – Pp. 17–29.
  22. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2014). On Codes With Summation of Data Bits in Concurrent Error Detection Systems [O kodakh s summirovaniem edinichnykh razryadov v sistemah funktsional'nogo kontrolya]. *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*, issue 8. – Pp. 131–145.
  23. Das D., Touba N. A. (1999). Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium, USA, California, 1999*. – Pp. 370–376.
  24. Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M. (2000). Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. *Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000*. – Pp. 171–176.
  25. Ghosh S., Lai K. W., Jone W. B., Chang S. C. (2004). Scan Chain Fault Identification Using Weight-Based Codes for SoC Circuits. *Proceedings of 13th Asian Test Symposium, 15–17 November 2004*. – Pp. 210–215.
  26. Mekhov V. B., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2008). Checking of Combinational Circuits Basing on Modification Sum Codes [Kontrol' kombinatsionnykh skhem na osnove modifitsirovannykh kodov s summirovaniem]. *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*, issue 8. – Pp. 153–165.
  27. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017). Modulo weighted codes with summation with minimum number of undetectable errors in data vectors [Modul'no-vzveshennye kody s summirovaniem s naimen'shim obshchim chislom neobnaruzhivaemykh oshibok v informatsionnykh vektorah]. *Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie]*, vol. 39, issue 4. – Pp. 69–88.
  28. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017) Codes with summation with a sequence of weight coefficients, forming a natural series of numbers, in concurrent error detection systems [Kody s summirovaniem s posledovatel'nost'yu vesovykh koeffficientov, obrazuyushchej natural'nyj ryad chisel, v sistemah funktsional'nogo kontrolya]. *Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie]*, vol. 39, issue 5. – Pp. 37–58.

29. Sapozhnikov Val., Efanov D., Sapozhnikov Vl., Dmitriev V. (2017). Method of Combinational Circuits Testing by Dividing its Outputs into Groups and Using Codes, that Effectively Detect Double Errors. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 129–136.
30. Goessel M., Sogomonyan E. S. (1992). Design of Self-Testing and Self-Checking Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs [Postroenie samotestiruemyykh I samoproverjaemykh kombinatsionnykh ustrojstv so slabonezavisimymi vykhodami]. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 150–160.
31. Sogomonyan E.S., Gössel M. (1993). Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, vol. 4, issue 4. – Pp. 267–281.
32. 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, issue 1. – Pp. 19–28.
33. Saposhnikov Val. V., Morosov A., Saposhnikov Vl. V., Gössel M. (1998). A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, vol. 12, issue 1–2. – Pp. 41–53.
34. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. (2000). Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. VLSI Design, vol. 11, issue 1. – Pp. 47–58.
35. Ostanin S. (2017). Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 696–699.
36. Matrosova A., Mitrofanov E. (2016). Pseudo-Exhaustive Testing of Sequential Circuits for Multiple Stuck-at Faults. Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 533–536.
37. Efanov D. V., Kostrominov A. M., Manakov A. D., Makshanov A. V., Sharov V. A. (2018). Modified modulus weight-based sum codes in experiment on organization of concurrent error detection systems of combinational benchmarks [Modul'nomodificirovannye vzveshennye kody s summirovaniem v ehksperimente po organizacii sistem funkcional'nogo kontrolya testovykh kombinacionnykh skhem], Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], vol. 15, issue 2. – Pp. 311–322.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Р. Убаром  
Поступила в редакцию 11.01.2018, принята к публикации 28.02.2018*

*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 систем мониторинга и диагностики 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., 2019

Подписано в печать с оригинал-макета 27.03.2019.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л.      Уч.-изд. л.  
Установочный тираж      экз. Заказ      . Цена свободная.

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