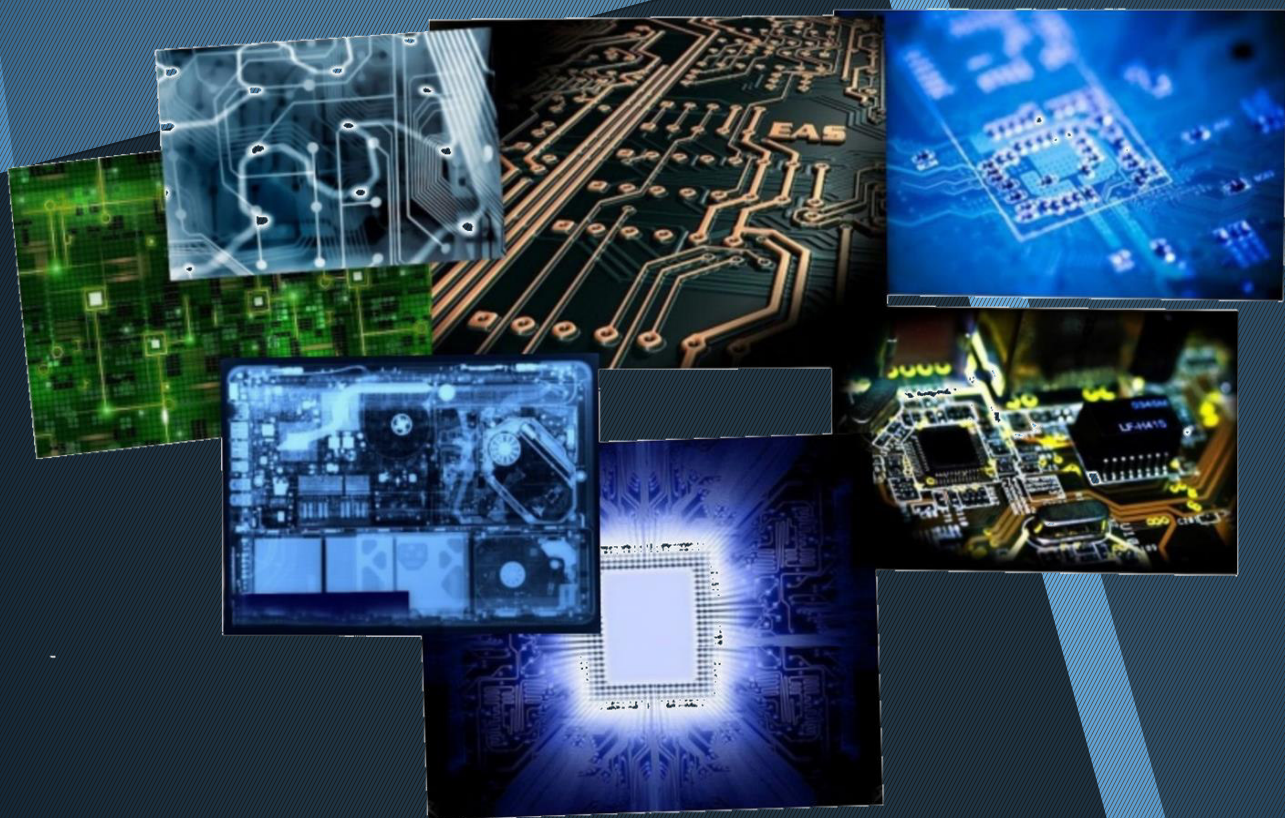




Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

# НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ



Омск 2019

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
ОАО «Российские железные дороги»  
Омский государственный университет путей сообщения

---



«НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ,  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ»

Материалы всероссийской научно-технической конференции  
(25 октября 2019 г.)

УДК 621.39:004

ББК 32

Н17

**Надежность функционирования и информационная безопасность инфокоммуникационных, телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем:** Материалы всероссийской научно-технической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2019. 250 с.

В октябре 2019 года в Омском государственном университете путей сообщения прошла всероссийская научно-техническая конференция «Надежность функционирования и информационная безопасность инфокоммуникационных, телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем».

В конференции приняли участие обучающиеся и сотрудники ОмГУПС и других вузов России, Республики Узбекистан.

В сборник вошли статьи, в которых рассмотрены надежность функционирования телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем, а так же информационная безопасность транспортных и инфокоммуникационных систем.

Материалы конференции могут быть полезны для студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых, научных сотрудников и специалистов, работающих в области функционирования и информационная безопасность инфокоммуникационных, телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Библиогр.: 202 назв. Табл. 22. Рис. 111.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук, доцент С. Г. Шантаренко (отв. редактор);

доктор техн. наук, профессор В. Е. Митрохин;

канд. техн. наук, доцент К. С. Фадеев;

канд. техн. наук Е. В. Пономарев.

ISBN 978-5-949-41248-0

---

© Омский гос. университет  
путей сообщения, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Надежность функционирования телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем**

А. А. Богданов, Е. Ю. Копытов, Е. Д. Бычков. Автоматизированный анализ надежности необслуживаемых средств связи в среде AnyLogic 7.....	5
Д. А. Федотов, В. Е. Митрохин. Методика расчета искажения импульса при распространении через волновод поездной радиосвязи .....	13
К. В. Авдеева, Н. К. Якунчихина. Анализ помех электрифицированного железнодорожного транспорта.....	17
Н. В. Зиновьев. Анализ подверженности телекоммуникационных систем беспилотных летательных аппаратов внешним воздействиям.....	22
Д. И. Бизин. Исследование процесса распространения сигналов технологий IEEE 802.11 с учетом экранирующих свойств среды.....	30
В. Е. Митрохин, П. Г. Рингенблум, И. Н. Башков. Анализ методов прогнозирования трафика в телекоммуникационных сетях .....	38
Н. Е. Агарков. Широкополосный контроль и измерение параметров среды передачи в телекоммуникационных системах.....	46
А. С. Стельмашук. Цифровая железная дорога: переход от GSM-R к LTE-R.....	52
К. А. Бондаренко. Анализ систем цифровой манипуляции и помехоустойчивого кодирования для поездной радиосвязи гектометрового диапазона.....	62
Ю. Ю. Ушнурцева. Методика синтеза параметров испытательных импульсов на основе аналитических моделей .....	68
Д. В. Демиденко. Методика разработки алгоритма функционирования радиомодема для регистрации токов в заземляющем устройстве оборудования телекоммуникаций.....	73
Д. Е. Быченков. Об обнаружении ошибок в беспроводных сетях с кооперативной ретрансляцией.....	78
Е. В. Демух, Р. А. Платковский. Перспективы развития цифровых беспроводных сетей связи на железнодорожном транспорте.....	82
А. С. Харитонов, Г. Л. Штрапенин. Программное моделирование и оптимизация радиотехнических систем.....	89
А. С. Валенко, В. С. Ядрышников. Оценка и устранение зон радиотени поездной радиосвязи.....	96
И. С. Балашов. Способы решения проблем определения местоположения мобильных абонентов транкинговых сетей связи в условиях отсутствия сигналов от спутников глобального позиционирования.....	103
А. В. Ряполов, Д. А. Гредяев, Н. В. Фамбулов. Модель приемной цифровой антенной решетки спутниковых радионавигационных систем.....	108

М. Е. Сапсаева. Применение пакетной коммутации на сетях железнодорожного транспорта.....	117
Р. А. Платковский, З. Е. Скуратов. Особенности построения беспроводных сенсорных сетей на железнодорожном транспорте.....	123

## **Надежность функционирования и информационная безопасность транспортных и инфокоммуникационных систем**

Е. А. Альтман, А. В. Александров, Т. В. Васеева. Современные информационные технологии разработки программ для обработки радиотехнических сигналов на примере БПФ.....	132
А. В. Шилер, Д. А. Войтенко, О. С. Бутов. Блокчейн: безопасность алгоритмов консенсуса.....	140
Д. В. Беленков, Е. Д. Бычков, Ж. Т. Беленкова. Алгоритм решения операции композиции нечетких множеств на основе языка программирования верхнего уровня Python.....	149
Е. А. Степанова, Е. В. Родина, А. К. Шмаков. Применение искусственных нейронных сетей для восстановления искаженных образов.....	155
О. В. Литвинова. Анализ методов определения мест повреждения изоляции кабеля.....	165
Е. Д. Бычков, Д. А. Титов. Метод классификации параметров объектов на основе мягких вычислений.....	171
О. Н. Коваленко, К. С. Фадеев, М. С. Гуртовой. Методика интегральной оценки при выборе оборудования SoftSwitch.....	178
З. Е. Скуратов, Е. В. Демух. Применение многосердцевидных оптических волокон с целью увеличения пропускной способности тракта передачи.....	184
А. Н. Громов, К. С. Фадеев. Анализ информационной безопасности.....	192
П. А. Мельников. Анализ концепции российского законодательства и нормативно-правового обеспечения в сфере телекоммуникаций.....	201
Т. Н. Нишанбаев, М. М. Абдуллаев, С. О. Махмудов. Распределение запросов внешнего трафика по виртуальным серверам cloud-дата центра.....	206
Б. Х. Очилов, М. М. Хасанов, У. И. Ахтамов. Анализ методов диагностики оптического волоконного кабеля.....	213
А. М. Назаров, Б. Х. Очилов, М. М. Хасанов. Обеспечение надежности эксплуатационных характеристик волоконно-оптических линий связи.....	220
О. С. Абляимов, С. М. Азимов, Б. И. Гайратов. К диагностике технического состояния подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя.....	227
О. С. Абляимов, Ж. Д. Ходжиев, Б. И. Гайратов. Анализ эффективности тормозных систем скоростного подвижного состава.....	234
О. С. Абляимов, А. А. Мавлонов, С. М. Гултораев. Оценка эффективности перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М на участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги.....	241

# Надежность функционирования телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем

---

УДК 519.248

**Е. Ю. Копытов, А. А. Богданов, Е. Д. Бычков**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ НЕОБСЛУЖИВАЕМЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ В СРЕДЕ ANYLOGIC 7**

*Аннотация.* Современные компьютерные технологии используются для анализа надежности характеристик систем различных отраслей промышленности, в том числе и на транспорте. В работе представлена модель эксплуатации необслуживаемых средств связи в региональном центре связи, реализованная в среде имитационного моделирования AnyLogic 7. Модель построена с применением дискретно-событийного подхода и позволяет дать оценку коэффициенту готовности средств связи в зависимости от совокупности входных параметров.

*Ключевые слова:* железнодорожная электросвязь, надежность, коэффициент готовности, имитационное моделирование, AnyLogic.

**Evgeniy Y. Kopytov, Alexandr A. Bogdanov, Evgeniy D. Bychkov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **COMPUTER-BASED ANALYSIS OF RELIABILITY OF MAINTENANCE-FREE TELECOMMUNICATION EQUIPMENT IN ANYLOGIC 7**

*Abstract.* Modern computer technologies are used to analyze reliability characteristics of systems in different sectors of industry, as well as in transportation field. In the work, a simulation model of maintenance-free telecommunication equipment operation in a regional communication centre that is developed in AnyLogic 7. The model is realized using the discrete-event approach and allows the assessment of the availability factor of telecommunication equipment as a function of input parameters.

*Keywords:* railway telecommunications, reliability, availability, simulation, AnyLogic.

Надежность современных сетей железнодорожной электросвязи (ЖДЭ) является важной составляющей качества и необходимым условием обеспечения безопасности перевозочного процесса [1]. Уровень надежности средств ЖДЭ

зависит от множества факторов, таких как интенсивности отказов и разрегулировок блоков и компонентов аппаратуры, наличие запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), времени устранения отказов, вероятности ошибок средств диагностики.

Основным комплексным показателем надёжности аппаратуры ЖДЭ является коэффициент готовности  $K_{\Gamma}$  [1, 2].

Одним из наиболее популярных сегодня методов анализа и оценки надёжностных характеристик различных систем является имитационное моделирование [3]. Оно находит применение при оценке надёжности автотранспортных систем [4] определении наиболее эффективных вариантов обслуживания транспортных потоков [5], анализе пропускной способности ж.д. линий [6].

В последнее время всё большую известность среди учёных и исследователей приобретает отечественный инструмент имитационного моделирования AnyLogic. Данная среда используется, например, для анализа показателей эксплуатационной работы железнодорожного узла [7], моделирования расписания движения транспортных средств [8], а также для оценки комплексных показателей надёжности и качества технического обслуживания аппаратуры ЖДЭ [9].

С целью расчета коэффициента готовности  $K_{\Gamma}$  необслуживаемых средств ЖДЭ была поставлена задача разработки имитационной модели процесса их эксплуатации с помощью инструмента AnyLogic.

Исходя из поставленной выше цели, был определен набор входных параметров модели. К ним относятся:  $L_{ot}$  – интенсивность отказов,  $L_r$  – интенсивность разрегулировок;  $L_{otr}$  – интенсивность отказов разрегулированной системы;  $T_p$  – время обнаружения ложного отказа;  $T_r$  – время восстановительного ремонта,  $Q_{ZIP}$  – вероятность отсутствия ЗИП,  $dopvr$  – время ожидания поступления ЗИП,  $a_1$  – вероятность ошибки встроенных средств диагностики первого рода,  $b_1$  – вероятность ошибки встроенных средств диагностики второго рода,  $E_r$  – вероятность ошибки обслуживающего персонала при проведении восстановительного ремонта.

Выходными параметрами модели служат:  $K_g$  ( $K_{\Gamma}$ ) – коэффициент готовности,  $TS_0$  – общее время нахождения в работоспособном состоянии,  $TS_1$  – общее время нахождения в состоянии разрегулировки,  $TS_2$  – общее время нахождения в неработоспособном состоянии по причине явного отказа,  $TS_3$  – общее время нахождения в неработоспособном состоянии по причине скрытого отказа,  $TS_4$  – общее время нахождения в состоянии ложного отказа.

Учитывая совокупность приведенных выше параметров, процесс эксплуатации необслуживаемого оборудования ЖДЭ может быть описан следующим набором состояний:

$S_0$  – работоспособное состояние;

$S_1$  – состояние разрегулировки;

$S_2$  – неработоспособное состояние по причине явного отказа;

$S_3$  – неработоспособное состояние по причине скрытого отказа

$S_4$  – состояние ложного отказа.

Соответствующая выделенному набору состояний диаграмма представлена на рис. 1.

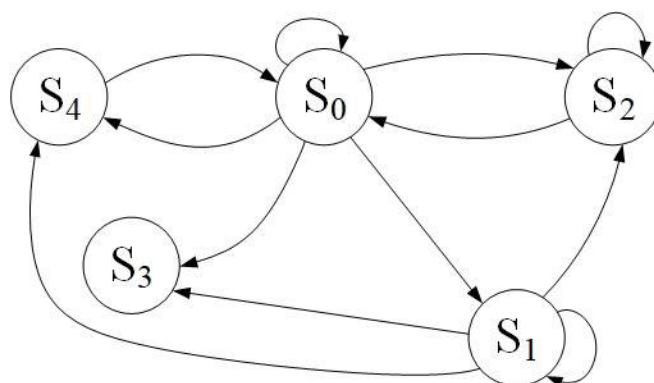


Рисунок 1 – Диаграмма состояний необслуживаемой системы

Вероятности переходов между состояниями данной диаграммы описываются с помощью матрицы переходных вероятностей (1). Здесь строка представляет исходное состояние, а столбец – конечное. Совокупность вероятностей в каждой строке образует полную группу событий.

$$P = \begin{pmatrix} (1-a_1)(1-Q_{ot})(1-Q_r) & (1-Q_{ot})Q_r & (1-b_1)Q_{ot} & b_1Q_{ot} & a_1(1-Q_{ot})(1-Q_r) \\ 0 & (1-a_1)(1-Q_{otr}) & (1-b_1)Q_{otr} & b_1Q_{otr} & a_1(1-Q_{otr}) \\ 1-E_r & 0 & E_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $Q$  – экспоненциальная функция распределения вероятности:

$$Q = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $t$  – наработка системы.

Расчет случайного времени, через которое происходят инциденты производится в соответствии с формулой:

$$\tau = \frac{\ln(1-\xi)}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\xi$  – случайная величина, генерируемая в соответствии с равномерным

законом распределения в интервале  $[0;1]$ .

Это обосновывается рассмотрением процесса эксплуатации на нормальном этапе, характеризующимся постоянством интенсивности отказов и использованием экспоненциального закона распределения времени наработки на отказ.

Статистическое моделирование исследуемого процесса выполняется путем многократной реализации прогонов модели и сбора статистических данных с последующей их обработкой. Следует отметить, что модель является гибкой в настройке и позволяет вводить произвольные значения входных параметров.

Необходимое количество прогонов модели  $kp$  может быть вычислено с помощью неравенства Чебышева [10]. Задаваясь условием, что оценки входных параметров будут попадать в диапазон  $\mu \pm \sigma/20$  с вероятностью 0.95, оно может быть вычислено по формуле:

$$20^2 / (1 - 0.95) = 8000. \quad (4)$$

Коэффициент готовности в рассматриваемой модели рассчитывается по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{TS_0 + TS_1 + TS_4}{TS_0 + TS_1 + TS_2 + TS_3 + TS_4}, \quad (5)$$

где  $TS_0$  – время нахождения в работоспособном состоянии;

$TS_1$  – время нахождения в состоянии разрегулировки;

$TS_2$  – время нахождения в неработоспособном состоянии по причине явного отказа;

$TS_3$  – время нахождения в неработоспособном состоянии по причине скрытого отказа;

$TS_4$  – время нахождения в состоянии ложного отказа.

Для демонстрации работы предложенной модели был выполнен ряд имитационных экспериментов, в ходе которых были получены график оценок коэффициента готовности  $K_{\Gamma}$  от времени  $t$  (рис. 3) а также гистограмма количества произошедших инцидентов (рис. 4) при изменяемой интенсивности отказов.

Интерфейс разработанной модели приведен на рис. 2.

Значения входных параметров модели для проведения экспериментов приведены в табл. 1.

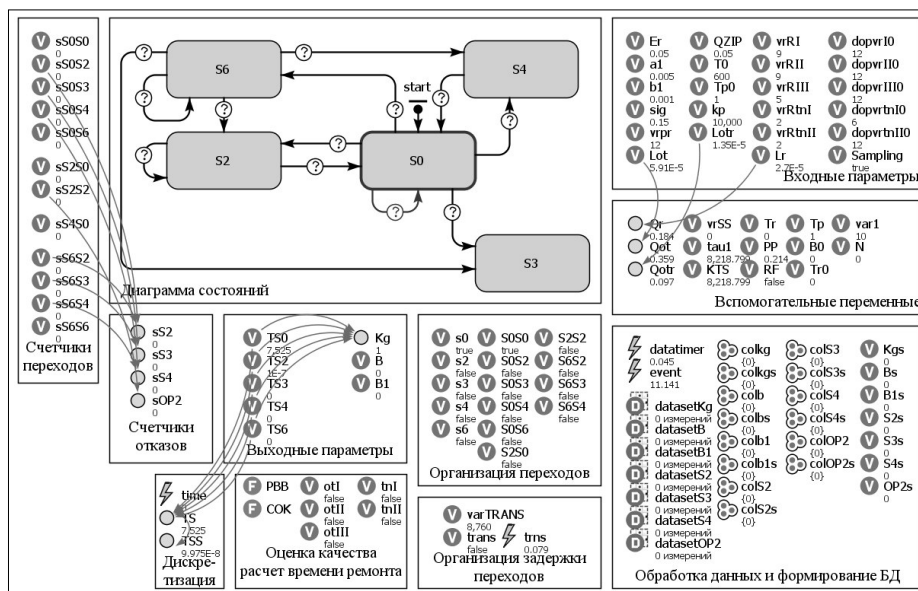


Рисунок 2 – Вид окна «Main»

Таблица 1

Входные параметры для проведения имитационного эксперимента

Параметр	Значение
Интенсивность отказов работоспособной системы $L_{ot}, 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$	5; 6; 7; 8; 9
Интенсивность разрегулировок системы $L_r, 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$	$0,5 \cdot L_{ot}$
Интенсивность отказов разрегулированной системы $L_{otr}, 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$	$0,25 \cdot L_{ot}$
Математическое ожидание времени ожидания ЗИП при: отказах, $dopvrI0 - dopvrIII0$	12
технологических нарушениях, $doptnI0, doptnII0, \text{ ч}$	6
Вероятность отсутствия ЗИП $QZIP$	0,05
Математическое ожидание времени проверки оборудования на ложный отказ $T_{p0}, \text{ ч}$	1
Математическое ожидание времени ремонта при: отказе первой категории, $vrRI$	9
отказе второй категории, $vrRII$	9
отказе третьей категории, $vrRIII$	5
технологическом нарушении первой категории, $vrRtnI$	2
технологическом нарушении второй категории, $vrRtnII, \text{ ч}$	2
Вероятность ошибки обслуживающего персонала при проведении восстановительного ремонта, $E_r$	0,05
Вероятность ошибки первого рода встроенных средств диагностики, $a_1$	0,005
Вероятность ошибки второго рода встроенных средств диагностики, $b_1$	0,001
С.к.о. временных параметров модели $sig$	0,15
Количество прогонов $kp$	8000
Время одного прогона $vrpr, \text{ лет}$	10

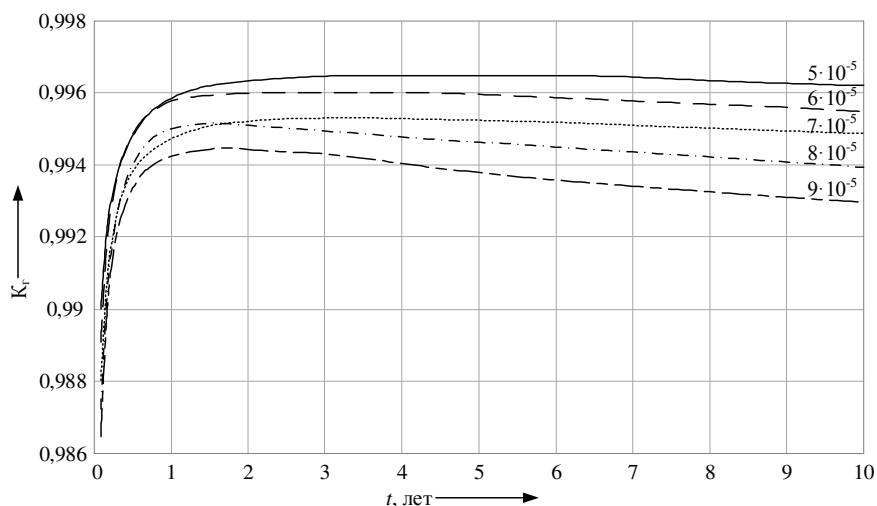


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента готовности  $K_T$  от времени  $t$  при изменении интенсивности отказов  $L_{от}$

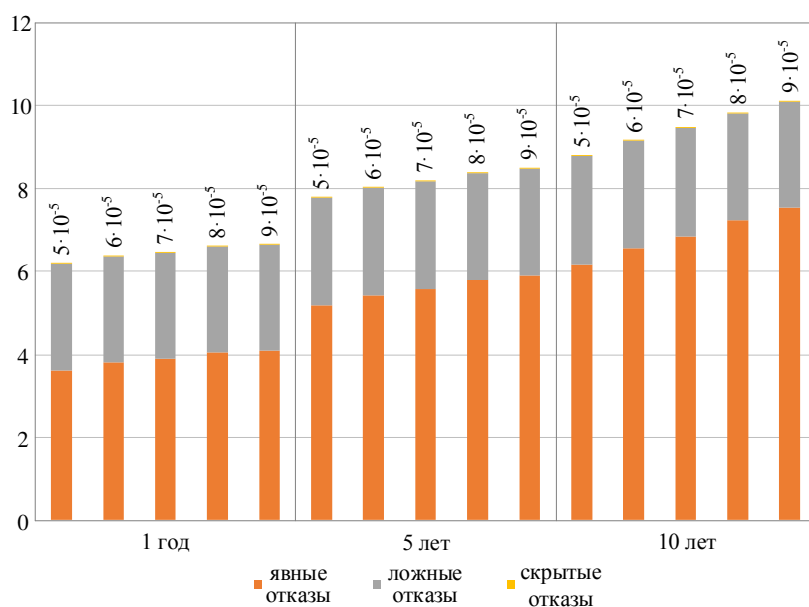


Рисунок 4 – Количество произошедших инцидентов при изменении интенсивности отказов  $L_{от}$

Семейство кривых оценок коэффициента готовности стремится к установившимся значениям. Так как начальным состоянием может быть как работоспособное, так и неработоспособное, то каждая кривая имеет экстремум. Конечные значения коэффициента готовности для интенсивностей  $6 \cdot 10^{-5}$ ,  $7 \cdot 10^{-5}$ ,  $8 \cdot 10^{-5}$  и  $9 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$  составляют соответственно 99,93, 99,87, 99,77, 99,68 % от значения  $K_T$  при интенсивности отказов, равной  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Анализируя гистограмму количества произошедших инцидентов, можно сказать, что наибольшую долю составляют явные отказы, скрытые отказы происходят крайне редко. Основная часть инцидентов приходится на первый

год эксплуатации аппаратуры, поэтому необходимым является проведение процедуры приработки.

В работе была представлена имитационная модель процесса эксплуатации необслуживаемых средств ЖДЭ в РЦС, разработанная в среде AnyLogic с применением дискретно-событийного подхода к моделированию. Данная модель позволяет производить оценку коэффициента готовности  $K_T$  оборудования железнодорожной электросвязи.

Разработанная модель учитывает скрытые, явные и ложные отказы, ошибочные действия обслуживающего персонала при проведении восстановительных работ, ошибки внутренних средств диагностики, продолжительность проведения восстановительных работ, а также вероятность отсутствия и время ожидания комплектов ЗИП.

Преимуществом данной модели является простота ее использования, а также возможность более быстрого получения результатов в сравнении с натурными испытаниями.

#### Список литературы

1. Научно-методические основы управления надёжностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта: монография / В. К. Котов, В. Р. Антонец и др. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012. – 193 с.
2. Держо, Г. Г. Количественная оценка вклада систем связи в безопасность технологических процессов на железнодорожном транспорте: Монография / Г. Г. Держо. – М.: УМЦ ЖДТ, 2007. – 130 с.
3. Сапожников, В. В. Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебное пособие для вузов ж.д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.
4. Якубович, А. Н. Оценка надёжности автотранспортных систем методами статистического моделирования (аналитический обзор) / А. Н. Якубович, И. А. Якубович, В. И. Рассоха // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. – № 1. – С. 89 – 94.
5. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети / И. В. Максимей, Е. И. Сукач и др. // Математические машины и системы. – 2008. – № 4. – С. 147 – 153.
6. Кокурин И. Оценка пропускной способности железнодорожных линий на основе имитационного моделирования процессов перевозок / И. Кокурин, В. Кудрявцев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 2. – С. 18 – 22.

7. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic / А. А. Любченко, С. В. Бартош и др. // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 87 – 92.

8. Merkurjeva, G. Vehicle schedule simulation with AnyLogic / G. Merkurjeva, V. Bolshakovs // 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. – 2010. – IEEE. – pp. 169 – 174. Doi: 10.1109/UKSIM.2010.38

9. Любченко, А. А. Автоматизированный анализ надежности и качества технического обслуживания оборудования связи с помощью современных средств моделирования / А. А. Любченко, Е. Ю. Копытов, А. А. Богданов // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13. – № 5. – С. 12 – 20.

10. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Копытов Евгений Юрьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: jenya87@list.ru

### **Богданов Александр Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: Alex-b0g@yandex.ru

### **Бычков Евгений Дмитриевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kopytov Evgeniy Yurevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Department of

«Telecommunications, radio system and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: jenya87@list.ru

### **Bogdanov Alexander Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Post-graduate student of the department

«Automation and control systems» OSTU

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: Alex-b0g@yandex.ru

### **Bychkov Evgeniy Dmitrievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Dr. Sci. Tech., professor at the department

«Telecommunication, radio engineering systems and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

**Д. А. Федотов, В. Е. Митрохин**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИСКАЖЕНИЯ ИМПУЛЬСА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЧЕРЕЗ ВОЛНОВОД ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

***Аннотация.** Исследовано влияние дисперсии в волноводе поездной радиосвязи при передаче цифрового сигнала. Показана зависимость фазовой скорости от частоты. Установлена связь между дисперсией и скоростью передачи информации по волноводу, дальностью передачи и удельным сопротивлением земли.*

***Ключевые слова:** дисперсия, импульсный сигнал, волновод поездной радиосвязи, скорость передачи информации, преобразование Фурье.*

**Dmitry A. Fedotov, Valery E. Mitrokhin**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **METHOD OF CALCULATION OF PULSE DISTORTION AT PROPAGATION THROUGH A WAVEGUIDE OF TRAIN RADIO COMMUNICATION**

***Abstract.** The effect of dispersion in the waveguide of train radio communication in the transmission of a digital signal is investigated. The dependence of phase velocity on frequency is shown. The connection between the dispersion and the speed of information transmission through the waveguide, the transmission distance and the resistivity of the earth is established.*

***Keywords:** dispersion, a pulse signal, the waveguide of the train radio, the speed of information transfer, Fourier transform.*

Для передачи сигналов в телекоммуникациях используют линии связи. К таким линиям относятся металлические волноводы поездной радиосвязи. Особенностью электрических и магнитных волн в волноводах поездной радиосвязи является то, что они могут распространяться только на частотах выше критической частоты, а их фазовая скорость зависит от частоты и удельного сопротивления земли.

Это значит, что в волноводах существует дисперсия. Дисперсия оказывает отрицательное влияние на передаваемые по волноводу сигналы, в частности, на передачу цифровых сигналов, представляющих из себя последовательность импульсов.

Пусть на вход волновода длиной  $X$  подается прямоугольный импульс длительностью  $\tau$  и амплитудой  $A$  (рис. 1).

$$E(t) = \begin{cases} A & \text{при } -\tau/2 \leq t \leq \tau/2, \\ 0 & \text{при } t < -\tau/2 \text{ и } t > \tau/2. \end{cases} \quad (1)$$

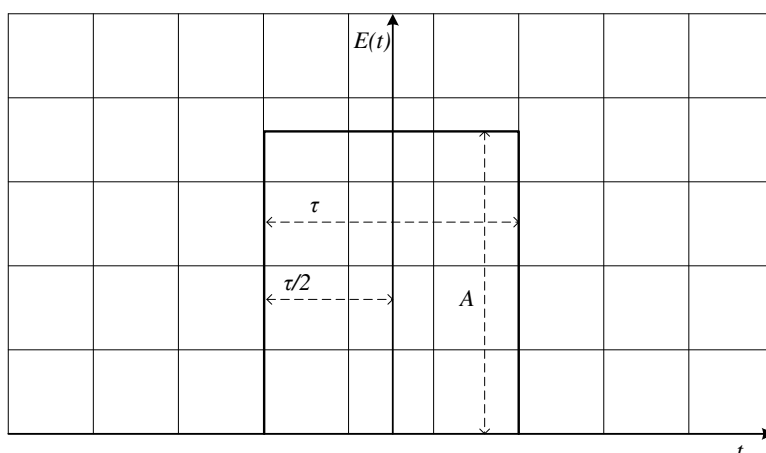


Рисунок 1 – Подаваемый на вход волновода импульс

Спектр сигнала  $E_0(\omega)$  определяется обратным преобразованием Фурье:

$$E_0(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

Спектр такого импульса представлен на рис. 2. Основная энергия такого спектра сосредоточена в ближайших к центральной частоте осцилляциях. Поэтому делаем допущение, что спектр импульса имеет конечную длину.

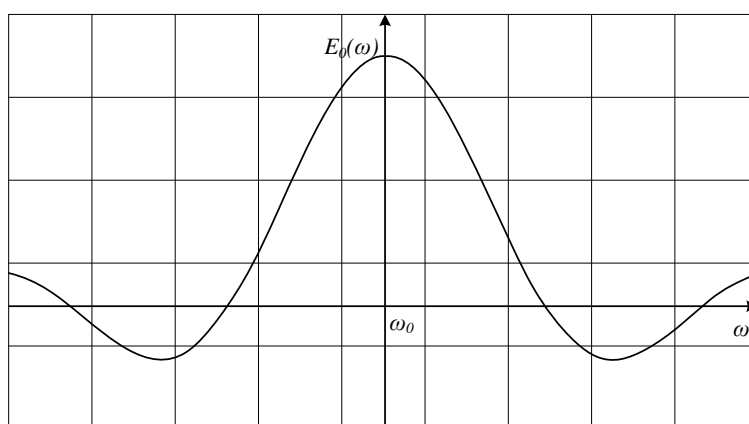


Рисунок 2 – Спектр подаваемого на вход волновода импульса

Импульс представляет собой сумму гармонических составляющих спектра, каждая из которых имеет свою амплитуду и фазу. Если бы все составляющие распространялись с одинаковой фазовой скоростью, то они одновременно появились бы на выходе волновода и результирующий сигнал совпадал бы с импульсом на входе, смещенным на время запаздывания. Но так как фазовая скорость зависит от частоты и волны могут распространяться не на всех частотах, то составляющие спектра импульса перемещаются по волноводу с разными

скоростями и приходят на выход в разное время, а отдельные частоты и вовсе не дойдут до выхода, если их частота меньше критической. Спектр сигнала на выходе волновода изменится, и форма импульса будет другой. В результате такого искажения форма импульса расплывется, и длительность увеличится (рис. 3.).

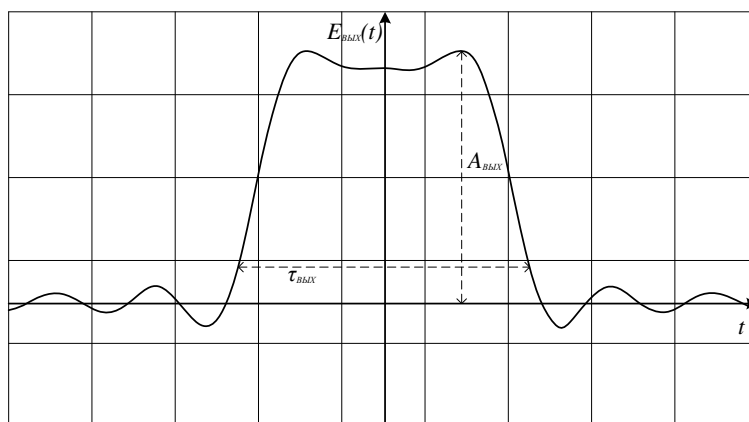


Рисунок 3 – Импульс на выходе волновода

Величина уширения импульса на выходе зависит от длительности входного импульса (от его ширины спектра), от его центральной частоты и от параметров волновода. В свою очередь параметры волновода определяются размерами, характеристиками материала из которого он изготовлен и удельного сопротивления земли [1].

Уширение импульса на выходе негативно сказывается на скорости передачи информации по волноводу. Так как информация передается в виде последовательности импульсов с определенной длительностью, то скорость определяется количеством импульсов передаваемых в единицу времени. Для повышения скорости длительность импульсов стремятся уменьшить, но минимально допустимая длительность передаваемых импульсов зависит от величины дисперсии в волноводу. Чем больше дисперсия, тем меньше скорость передачи. В этом случае при проектировании линии необходимо задаваться допустимой величиной дисперсии на выходе [2].

При прохождении расстояния  $z$  вдоль волновода каждая спектральная составляющая приобретает вид  $E_0(\omega)e^{-j\beta(\omega)z}$ . Сигнал на отрезке  $z$  волновода получаем через интеграл Фурье:

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_0(\omega)e^{j(\omega t - \beta(\omega)z)} d\omega. \quad (3)$$

В случае прохождения радиоимпульса (1) через участок волновода входной сигнал с несущей частотой  $\omega_0$  и огибающей  $A(t)$  представляется в виде:

$$E(t) = A(t)e^{j\omega_0 t}. \quad (4)$$

Тогда спектр данного сигнала:

$$E_0(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(t)e^{j(\omega_0 - \omega)t} dt = g(\omega_0 - \omega), \quad (5)$$

где

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(t)e^{-j\omega t} dt.$$

спектр огибающей входного сигнала.

Тогда сигнал на выходе отрезка волновода (3) будет иметь вид:

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega_0 - \omega)e^{j(\omega t - \beta(\omega)z)} d\omega, \quad (6)$$

или в виде мгновенного значения:

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega_0 - \omega) \cos(\omega t - \beta(\omega)z) d\omega. \quad (7)$$

Если спектр ограничен величиной  $2\Delta\omega$ , то бесконечные пределы интегрирования заменяются конечными от  $\omega_0 - \Delta\omega$  до  $\omega_0 + \Delta\omega$ .

Для прямоугольного импульса с длительностью  $\tau$ , с огибающей (рис. 1.):

$$A(t) = \begin{cases} E_m & \text{при } -\tau/2 \leq t \leq \tau/2, \\ 0 & \text{при } t < -\tau/2 \text{ и } t > \tau/2. \end{cases}$$

Спектр (5) принимает вид:

$$g(\omega_0 - \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} E_m e^{j(\omega_0 - \omega)t} dt = \frac{E_m \tau \sin((\omega_0 - \omega)\tau/2)}{2\pi (\omega_0 - \omega)\tau/2}. \quad (8)$$

Спектр прямоугольного импульса, определяемый (8), представлен на рис. 2. Как видно из рисунка основная энергия сосредоточена в ближайших к  $\omega_0$  осцилляциях. Поэтому для вычисления выходного сигнала нужно использовать выражение (6) с учетом (8), причем интегрирование по частоте производить в конечных пределах [3].

#### Список литературы

1. Михайлов, М. И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия / М. И. Михайлов. – М.: Связьиздат, 1959. – 586 с.
2. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
3. Василюк, Т. С. Компьютерная лабораторная работа «Исследование дисперсионных явлений, возникающих при передаче сигналов по прямоугольному волноводу» / Т. С. Василюк, Ю. И. Гришалевиц, А. Б. Прошин // Технологии информационного общества. – 2013. – № 11.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Федотов Дмитрий Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: fedotoff-dm@yandex.ru

### **Митрохин Валерий Евгеньевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.

Д.т.н., профессор кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: mitrokhin@list.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Fedotov Dmitry Anatolyevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Senior lecturer of the Department  
«Telecommunication, radio engineering  
systems and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: fedotoff-dm@yandex.ru

### **Mitrokhin Valery Evgenievich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of technical Sciences, Professor of the  
Department «Telecommunication, radio  
engineering systems and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: mitrokhin@list.ru

УДК 621.31

### **К. В. Авдеева, Н. К. Якунчихина**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ ПОМЕХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

*Аннотация.* В статье рассмотрен спектральный состав напряжения контактной сети постоянного и переменного токов, а также приведены результаты измерения составляющих напряженности магнитного поля помехи на тяговых подстанциях.

*Ключевые слова:* спектр, напряженность магнитного поля, помехи, влияние, тяговая подстанция.

### **Ksenia V. Avdeeva, Nadezhda K. Yakunchihina**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **ANALYSIS OF ELECTRIFICATED RAILWAY TRANSPORT INTERFERENCE**

*Abstract.* The article considers the spectral composition of DC and AC contact network voltage, and also presents the results of measuring electromagnetic interference at traction substations.

*Keywords:* spectrum, magnetic field strength, interference, influence, traction substation.

Электрифицированный железнодорожный транспорт является мощным источником электромагнитных помех. Он оказывает влияние на смежные сооружения и оборудование систем автоматики, связи, диагностики и электропитания. В настоящее время происходит широкое внедрение цифровых устройств на железнодорожном транспорте, что в свою очередь поднимает проблему электромагнитной совместимости.

Тяговая сеть постоянного тока оказывает влияние на смежные линии только за счет пульсаций, вызванных работой выпрямителя. На рис. 1, *а* представлен спектр напряжения в контактной сети при шестипульсовой схеме выпрямления. Согласно теореме Фурье периодический сигнал характеризуется набором гармоник, у которого основная частота определяется периодом исходного сигнала. В данном случае напряжение имеет постоянную составляющую и гармоники с частотами, кратными 300 Гц. Поскольку питание выпрямителя производится от сети с частотой 50 Гц, ее принимают за базовую частоту и говорят о частоте 300 Гц как о шестой гармонике. В гармоническом составе выпрямленного напряжения присутствуют гармоники с номерами 6, 12, 18 и т. д.

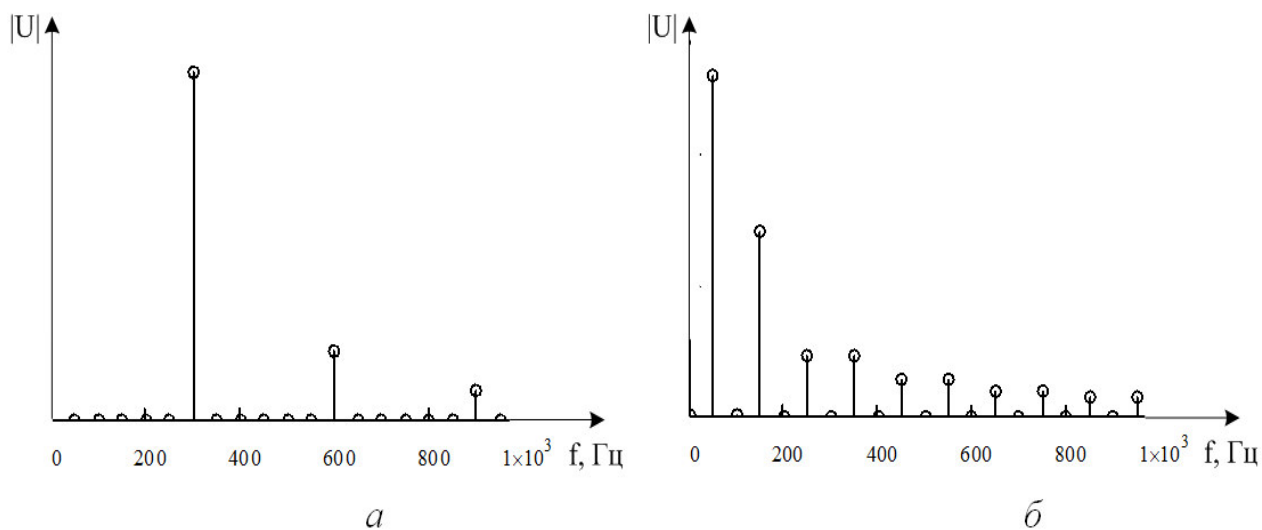


Рисунок 1 – Спектральный состав напряжения в контактной сети постоянного (*а*) и переменного (*б*) тока

Тяговая сеть переменного тока  $1 \times 25$  кВ оказывает наибольшее влияние на линии, прокладываемые вблизи железной дороги, поскольку является полностью несимметричной цепью и характеризуется токами в сотни ампер. При этом в спектре основной гармоникой является гармоника с частотой 50 Гц, а также присутствуют нечетные гармоники, возникающие за счет преобразования синусоиды тяговыми электродвигателями (рис. 1, *б*).

В настоящее время наблюдается тенденция по замене на тяговом подвижном составе коллекторного двигателя на асинхронный при энергоснабжении как на постоянном, так и на переменном токе. Поскольку тяга регулируется путем изменения частоты тока, потребляемого асинхронным двигателем, гармоники сетевого тока электровоза возникают в очень широком диапазоне частот. Проблема электромагнитной совместимости электроподвижного состава с другими цепями и устройствами решается путем предъявления жестких требований к уровню помех, допустимому при работе асинхронного двигателя [1].

Спектры, представленные на рис. 1, приведены для режима холостого хода в контактной сети. При появлении нагрузки начинают играть роль процессы, определяемые наличием в цепи целого ряда индуктивных элементов, препятствующих резким изменениям тока. Характер нагрузки оказывает значительное влияние на спектральный состав напряжения, в целом увеличивая уровень высших гармоник.

Для определения спектрального состава помех электрифицированного железнодорожного транспорта были проведены экспериментальные исследования на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока [2].

На тяговой подстанции постоянного тока (ТП) напряженность магнитного поля измерялась в десяти точках у различного оборудования, в том числе у ввода ЛЭП, под фидерами контактной сети, вблизи цепи отсоса, у реактора и выпрямительного устройства. На рис. 2 представлен спектр напряженности магнитного поля на входе реактора тяговой подстанции постоянного тока.

Как видно из графика, также как и на рис. 1, *a*, преобладают гармоники на частотах, кратных 300 Гц, поскольку на данной тяговой подстанции для преобразования переменного тока в постоянный применяется шестипульсовый выпрямитель. В отличие от рис. 1, *a* присутствуют и другие гармонические составляющие. Наличие нечетных гармоник объясняется влиянием токов, протекающих по оборудованию ТП от ЛЭП до выпрямителя, нечетных – искажениями формы выпрямленного напряжения.

На рис. 3 приведены спектральные составляющие напряженности магнитного поля на территории тяговой подстанции переменного тока.

Спектральный состав помехи на территории тяговой подстанции переменного тока слабо зависит от точки измерения. Наибольшей амплитуды достигают нечетные гармоники нижней части тонального диапазона. Однако вблизи отсоса и контактной сети сигнал помехи содержит также и четные гармоники, что обусловлено влиянием выпрямителей электровозов.

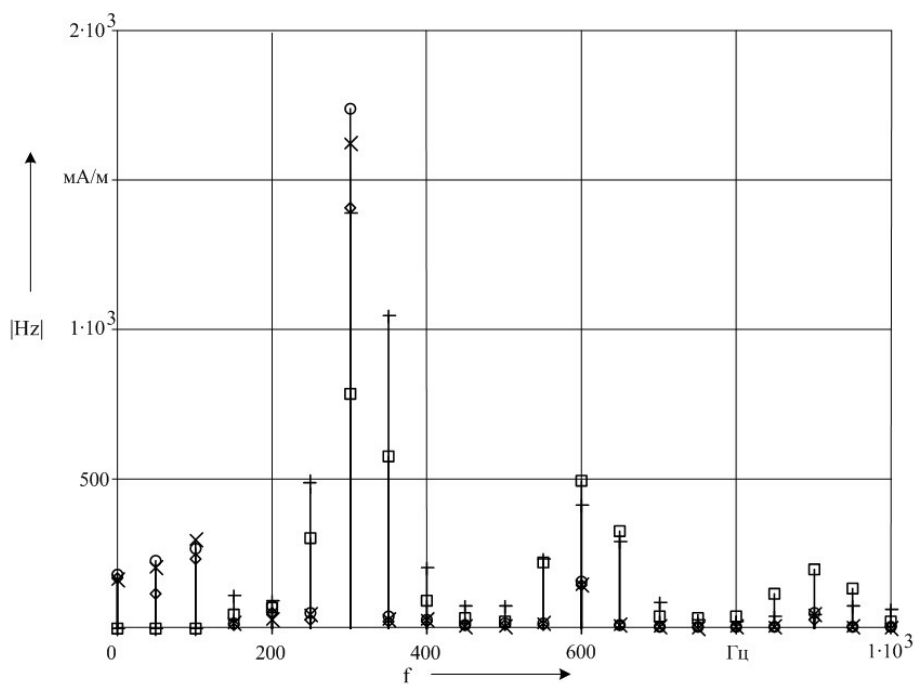


Рисунок 2 – Спектральный состав напряженности магнитного поля на входе реактора тяговой подстанции постоянного тока

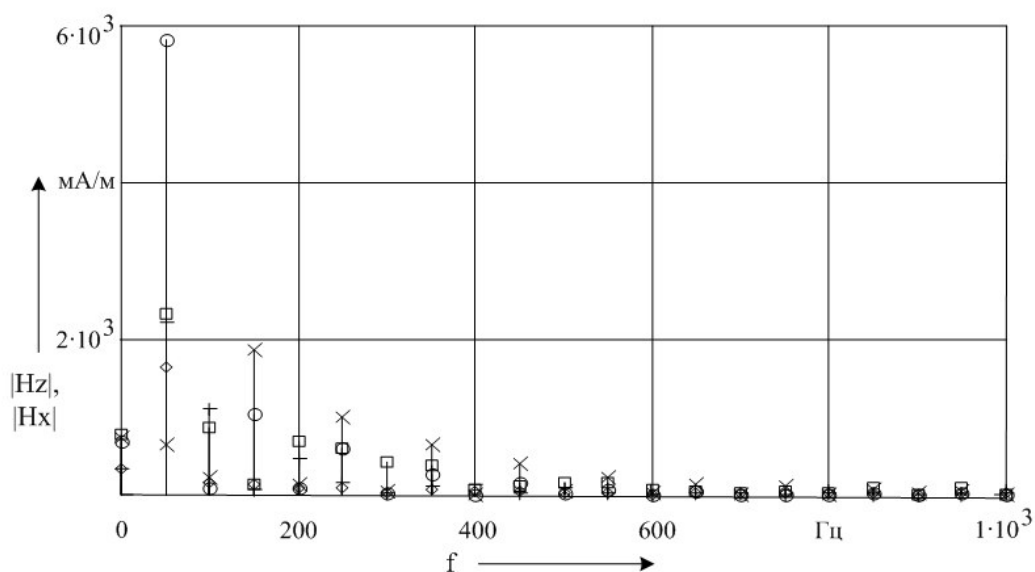


Рисунок 3 – Спектральный состав напряженности магнитного поля на территории тяговой подстанции переменного тока

Таким образом, электромагнитные помехи электрифицированного железнодорожного транспорта имеют сложный гармонический состав, обусловленный влиянием токов, протекающих в ЛЭП, выпрямительном оборудовании и т.д. Напряженность магнитного поля помехи имеет максимальную амплитуду на частоте 50 Гц – для электротяги переменного тока

и 300 Гц – для электротяги постоянного тока (при шестипульсовой схеме выпрямления). Кроме того, имеются диапазоны частот (например, от 100 до 150 Гц, от 450 до 500 Гц и т.д.), где помехи имеют минимальное значение, что делает эти диапазоны наиболее помехозащищенными. Таким образом, при проектировании, внедрении и эксплуатации оборудования на железнодорожном транспорте необходимо выполнить анализ электромагнитной обстановки, для того, чтобы обеспечить электромагнитную совместимость этого оборудования с электрифицированным железнодорожным транспортом.

#### Список литературы

1. ГОСТ 33436.3-1-2015 (IEC 62236-3-1:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2016. – 26 с.
2. Слептерева, Н. К. Экспериментальные исследования электромагнитных помех на тяговых подстанциях / А. О. Сырецкая, Н. К. Слептерева, К. С. Зуб // Известия Транссиба – 2013. – № 1 (13). – С. 64 – 69.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Авдеева Ксения Васильевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

##### **Якунчихина Надежда Константиновна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: viniwedal@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Avdeeva Ksenia Vasilievna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Candidate of technical sciences, associate  
professor of the department  
«Telecommunication, radiotechnical systems  
and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: avdeeva\_kv@mail.ru

##### **Yakunchihina Nadezhda Konstantinovna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Candidate of technical sciences, associate  
professor of the department  
«Telecommunication, radiotechnical systems  
and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: viniwedal@mail.ru

**Н. В. Зиновьев**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ ПОДВЕРЖЕННОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

***Аннотация.** В статье приведен анализ системы управления беспилотных летательных аппаратов на уязвимость к внешним дестабилизирующим воздействиям управления. В результате исследования был определен перечень систем подверженных внешнему воздействию, определена поверхность атак, выделены сильные и слабые стороны каждого из них.*

***Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, информационная безопасность, радиоэлектронное противодействие, телекоммуникационная система, безопасность.*

**Nikolay V. Zinoviev**

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russian Federation

## **ANALYSIS OF EXPOSURE TO TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLES**

***Abstract.** The article presents an analysis of the control system of unmanned aerial vehicles on vulnerability to external destabilizing effects of control. As a result of the study, a list of systems exposed to external influences was determined, the surface of attacks was determined, and the strengths and weaknesses of each of them were highlighted.*

***Keywords:** unmanned aerial vehicle, information security, electronic countermeasures, telecommunication system, security.*

### **Введение**

В настоящее время в беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются для широкого спектра задач, таких как разведка, мониторинг, транспортировка, передача данных, ретрансляция и вооруженных атак.

В 2012 году военная система США увеличила свои инвестиции в исследования и производство БПЛА с 2,3 млрд. долл. в 2008 г. до 4,2 млрд. долл. [1]. На сегодняшний день Россия также активно ведет разработки комплексов БПЛА, о чем свидетельствует большое количество научных исследований и опытно-конструкторских работ в данной направленности.

Такие происшествия как захват RQ-170 Sentinel Вооружёнными силами Ирана 4 декабря 2011 [2] или неоднократные статьи о захвате российского БПЛА Орлан-10 в небе над Сирией и Украиной [3,4], доказывают недостаточность защиты БЛА. В связи с повсеместным распространением БЛА возникает необходимость анализа технических уязвимостей и слабых мест БЛА.

### Объект исследования

В России на данный момент не существует каких либо требований и стандартов, регламентирующих систему управления БПЛА, в связи с чем для синтеза системы управления целесообразно использовать систему стандартов НАТО. Схема БПЛА в странах НАТО, определена в STANAG 4586 и представлена на рис. 1 [5].

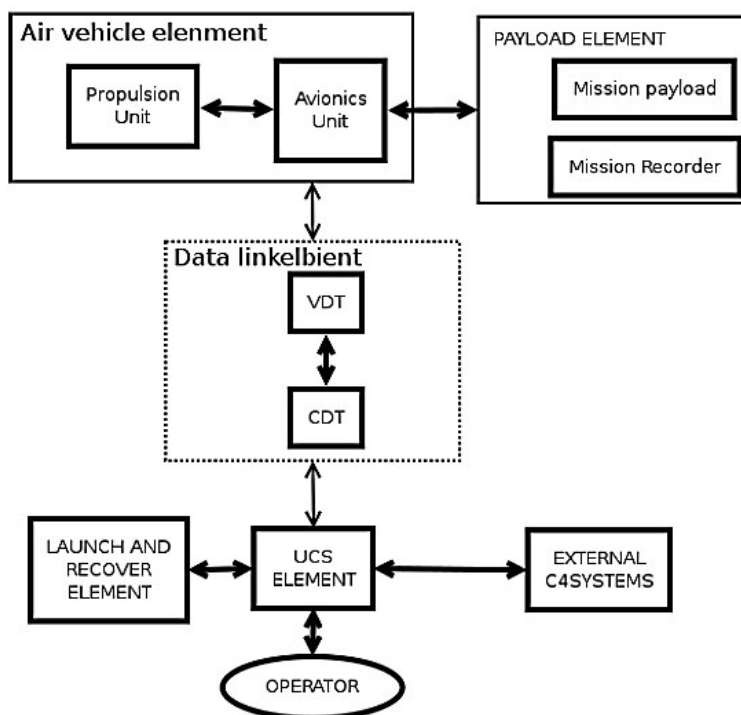


Рисунок 1 – Структурная схема БПЛА

Принято, что БПЛА должен состоять из трех основных элементов: системы полета БПЛА (air vehicle element), целевой нагрузки (payload element), и системы управления (UAV air component) для анализа возможности внешнего воздействия целесообразно рассмотреть элементы, которые могут взаимодействовать с другими компонентами посредством беспроводной линии связи (радио, оптической, акустической). В данном случае это может быть система управления и целевая нагрузка. Рассмотрим более подробно систему управления, схема представлена на рис. 2.

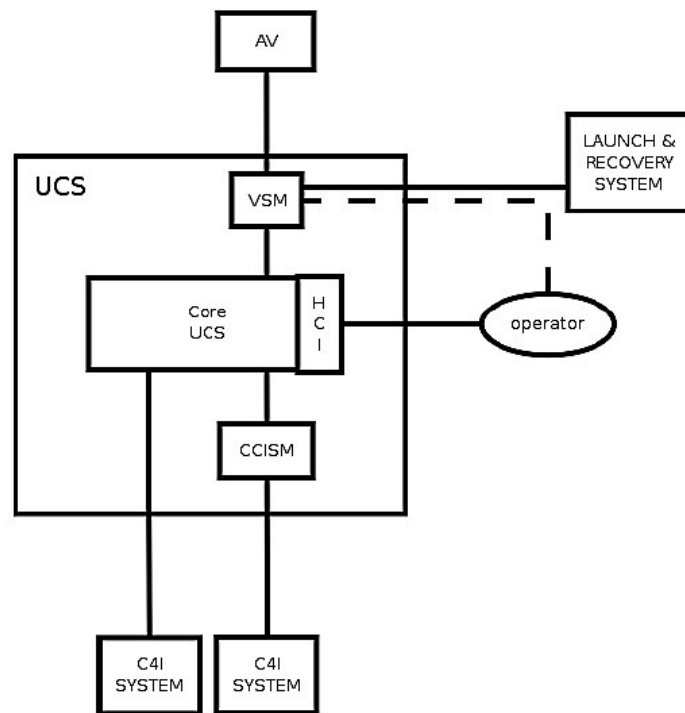


Рисунок 2 – Система управления БПЛА

STANAG 4586 [5] устанавливает требования к системе управления БПЛА и имеет следующую функциональную архитектуру:

- двигатель, средства маневрирования и поддержания полета (air vehicle/AV);
- контроллер управления двигателем (VSM);
- ядро (core USC);
- система запуска и возвращения (launch and recovery system);
- согласующий блок целевой нагрузки (CCISM);
- внешние подключаемые системы, могут быть целевой нагрузкой (c4I system).

Контроллер управления двигателем осуществляет согласование протоколов и синхронизацию между двигателем (AV), ядром (core USC), а также выполняет следующие функции:

- оптимизирует пакеты;
- ведет базу данных событий;
- следит за состоянием AV;
- может управлять каналом запуска и возвращения;
- осуществляет аналогово-цифровое преобразование данных с сенсоров двигателя и другого оборудования;
- передает данные, необходимые для контроля состояния летательного аппарата, а также передает команды управления от ядра.

Контролер управления для АВ как правило разрабатывается производителем БЛА и является необязательным при условии что БЛА выполнен с применением протокола, указанного в STANAG 4586 [5].

Ядро UCS должно предоставлять интерфейс оператору, который позволяет управлять и отображать параметрические данные состояния БЛА и целевой нагрузки.

В зависимости от требуемого уровня взаимодействия в конкретной системе БЛА, ядро выполняет следующие задачи [5]:

- прием, обработка и передача данных от контроллера управления для АВ, оператору и обратно;
- выполнение и планирование задач;
- наблюдение и контроль за ЛА, целевой нагрузкой;
- предоставление оператору необходимого инструмента для постановки, планирования и выполнения задачи;
- готовность принять на себя функции контроллера управления БПЛА.

Внешние подключаемые системы с4I – это и есть непосредственно целевая нагрузка, или могут быть какие-либо дополнительные системы, необходимые для эффективного функционирования БЛА.

Согласно [6] современные БЛА должны иметь возможность продолжать выполнение задания даже в случае потери связи с наземным центром, для чего требуется навигационная система, способная предоставлять для системы управления БЛА сведения о его пространственном положении. Проведенный анализ [5] и требования, выставляемые в [6], позволяют синтезировать дополнительную схему организации связи системы управления БЛА, представленную на рис. 3.

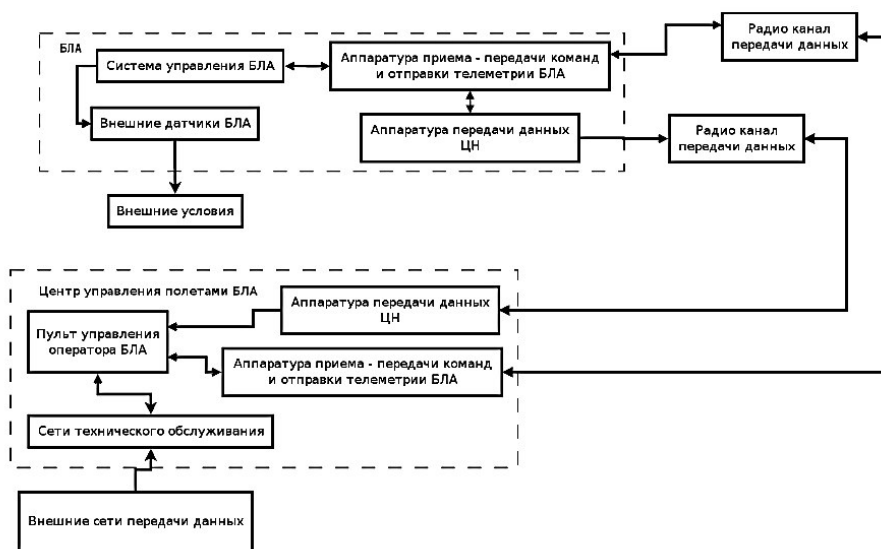


Рисунок 3 – Схема организации связи системы управления БПЛА

## **Анализ угроз безопасности системы управления БПЛА**

Проведя анализ схемы организации связи системы управления БПЛА, можно предположить возможность наличия трех векторов воздействия на систему:

- цент управления полетом БПЛА;
- БПЛА;
- радиоканал БПЛА.

Воздействие на центр управления полетом можно вести с двух сторон.

Первое воздействие со стороны внешних сетей передачи данных, путем обхода защиты и последующих действий вредоносного влияния (внедрение программных закладок, перенаправление трафика с последующей подменой пакетов и команд управления, а также других воздействий).

Вторым вектором взаимодействия на центр управления БЛА, является навязывание оператору ложной информации касательно состояния БЛА и его пространственного положения, через аппаратуру приема-передачи команд и отправки телеметрии или приема данных от целевой нагрузки, путем подмены трафика, приходящего на входной тракт приемного устройства центра управления: состояние объекта БЛА (скорости, угла атаки, высоты и состояния других датчиков), передача ложных данных с целью провокации оператора на действия, необходимые атакующему, и другие воздействия.

Воздействие на БЛА можно осуществить с трех направлений:

Перехват управления путем навязывания приемнику ложного (завышенного) значения сигнал/шум на входе приемного тракта, тем самым заставить систему приема снизить чувствительность приемника и таким образом исключить возможность воспринимать команды оператора, что даст возможность перехватить управление.

Достоинством методики является возможность осуществить полный захват управления БЛА.

Недостатки:

- необходимость знания протоколов связи;
- как и в случае воздействия на оператора наличие СКЗИ в канале сведет к минимуму вероятность перехвата управления;
- некоторые системы связи могут быть невосприимчивы к данному виду атаки.

### **Воздействие на целевую нагрузку**

Данный вид воздействия возможен в тех случаях, когда отказ или неправильное функционирование целевой нагрузки приводит к немедленному изменению или прекращению полетного задания. Эффективным может стать воздействие через радиоканалы на целевую нагрузку. Особенности реализации воздействия зависят от конкретного типа целевой нагрузки.

## **Воздействие на систему пространственного позиционирования БЛА**

Воздействие на систему пространственного позиционирования БЛА открывает большие возможности для комбинирования различных действий на внешние датчики БЛА.

Данное воздействие наиболее эффективно в момент управления с помощью автопилота или активного радиоподавления каналов управления БЛА и может привести к частичному или полному перехвату управления БЛА, срыву полетного задания или переводу системы в неопределенное состояние[7].

Также важной особенностью воздействия на систему пространственного позиционирования является тот факт, что изначально подобные системы разрабатывались для пилотируемой авиации и в самой идее их построения не вставал так остро вопрос противодействия целенаправленному злонамеренному воздействию. В связи с изложенным, вероятность выявления уязвимости гораздо выше, чем в других методах воздействия.

### **Вывод**

В данной работе было проведено синтезирование и анализ схемы организации передачи информации БЛА с выполнением требований [4]. Проведенный анализ показал наличие каналов воздействия на систему управления БЛА.

Были рассмотрены различные направления воздействия, целью которых является перехват управления над БЛА.

Из синтезированной схемы видно, что при разработке схем воздействий на конкретную реализацию системы управления необходимо учитывать подверженность линии связи к внешним атакам.

Важным фактором при осуществлении воздействий является взаимовлияние различных составляющих системы друг на друга.

При организации воздействия на конкретную реализацию системы управления немаловажным фактором является наличие доступа к документации. Также необходимо учитывать наличие программных уязвимостей, которые могут предоставить возможность организации недокументированного канала управления.

При проведении анализа угроз безопасности БЛА было выявлено, что наиболее уязвимым элементом системы управления БЛА является воздействие на систему пространственного позиционирования. Это обусловлено большим количеством комбинаций различных действий на внешние датчики БЛА и тем фактом, что изначально при разработки подобных систем не вставал так остро вопрос противодействия целенаправленному злонамеренному воздействию. На основании вышеизложенного было принято решение дальнейшие исследования направить на оценку уязвимости системы пространственного позиционирования.

Перечень выявленных векторов воздействия на систему управления БЛА представлен в табл. 1.

Таблица 1

## Перечень выявленных векторов воздействия на систему управления БПЛА

Вектор воздействия	Достоинства	Недостатки
Воздействие на центр управления БПЛА со стороны внешних сетей	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Полный контроль над БПЛА с функционалом оператора</li> <li>2. Вероятностная возможность воздействия на другие подчиненные центру управления полетом БПЛА составные части системы управления</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сложная реализация, автоматизация.</li> <li>2. Необходимо большое количество знаний конфиденциального характера.</li> <li>3. Необходим доступ к внешним сетям передачи данных, имеющим соединение с сетями технического обслуживания БПЛА</li> <li>4. Результат взаимодействия не определен, т.к. на него влияет много вероятностных факторов.</li> </ol>
Навязывание оператору БЛА ложной информации через аппаратуру приема-передачи команд и отправки телеметрии	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сравнительно несложная реализация.</li> <li>2. Возможность спровоцировать оператора на действия, необходимые атакующему.</li> <li>3. Существует вероятность осуществить сбой полетного задания.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимо находится в прямой радиовидимости антенн аппаратуры приема-передачи данных центра управления полетов.</li> <li>2. Нет полного контроля над БЛА.</li> <li>3. Реализация воздействия и его последствия сильно зависят от опыта оператора.</li> <li>4. Необходимо знание используемых протоколов связи.</li> <li>5. В случае применения в канале СКЗИ (имитовставка или шифрование), воздействие становится невозможным.</li> </ol>
Воздействие на приемно-передающий тракт системы управления БЛА	Полный контроль над БПЛА с функционалом оператора.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимо знание используемых протоколов связи.</li> <li>2. В случае применения в канале СКЗИ (имитовставка или шифрование), воздействие становится невозможным.</li> <li>3. Некоторые системы связи могут быть невосприимчивы к данному виду атаки.</li> </ol>
Воздействие на целевую нагрузку	1. Может привести к срыву полетного задания.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не может или очень редко может привести к захвату управления БЛА.</li> <li>2. В случае применения в канале СКЗИ (имитовставка или шифрование), воздействие становится невозможным.</li> </ol>
Воздействие на систему пространственного позиционирования БЛА	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Может привести к частичному или полному захвату управления.</li> <li>2. Легкая реализация.</li> <li>3. Воздействие плохо детектируется со стороны оператора.</li> <li>4. Для противодействия необходима разработка новых защищенных изделий.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Требуется предварительная разведка аппаратуры пространственного позиционирования.</li> <li>2. Необходимо иметь большое количество различного оборудования.</li> </ol>
Воздействие на радиоканал	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность осуществления полного контроля над БЛА.</li> <li>2. Возможность осуществления наблюдения за действием БЛА без ведома оператора.</li> <li>3. Контроль всех показателей телеметрии БЛА.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сложная реализация, автоматизация;</li> <li>2. В случае применения в канале СКЗИ (имитовставка или шифрование), воздействие становится невозможным.</li> <li>3. Необходимы знания используемых протоколов связи и управления спутника СУБЛА.</li> </ol>

## Список литературы

1. Baldor, Lolita C. Flashy drone strikes raise status of remote pilots [Electronic resource] / Lolita C. Baldor // The Boston Globe. – Access mode: <http://www.bostonglobe.com/news/nation/2012/08/11/air-force-works-fillneed-for-drone-pilots/ScoF70NqiiOnv3bD3smSXI/story.html/>
2. CNN Wire Staff. Obama says U.S. has asked Iran to return drone aircraft [Electronic resource]. – Access mode: <http://edition.cnn.com/2011/12/12/world/meast/iran-us-drone>.
3. Shachtman, Noah Exclusive: Virus Hits U.S. Drone Fleet [Electronic resource] / Noah Shachtman. – Access mode: <http://www.wired.com/dangerroom/2011/10/virus-hits-drone-fleet>.
4. STANAG 4586 (NATO Standardization Agreement 4586) is a NATO Standard Interface of the Unmanned Control System (UCS) Unmanned Aerial Vehicle (UAV).
5. The Vulnerability of UAVs to Cyber Attacks - An Approach to the Risk Assessment / K. Podins, J. Stinissen, M. Maybaum [Eds.] // 5th International Conference on Cyber Conflict, NATO CCD COE Publications. – Tallinn, 2013.
6. Бородин, В. В. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов / В. В. Бородин, А. М. Петраков, В. А. Шевцов // Труды МАИ. – 2015. – №81.
7. Митрохин, В. Е. Влияние импульсных электромагнитных полей на кабели пилотажно- навигационных сетей и рекомендации по выбору мер защиты / В. Е. Митрохин // Материалы международной научно – технической конференции «Авиация XXI века». – Воронеж, 1999.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Зиновьев Николай Викторович**  
Омский государственный технический университет (ОмГТУ).  
Мира пр., д.11, г. Омск, 644050,  
Российская Федерация.  
Аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностирования» ОмГТУ.  
Тел.: +7 (3812)31-06-94.  
E-mail: winpac\_55@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Zinoviev Nikolay Viktorovich**  
Omsk State Technical University (OmSTU).  
Mira pr., 11, Omsk, 644050,  
the Russian Federation.  
Graduate student of the department "Radio-technical devices and diagnostic systems" OmSTU.  
Tel.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: winpac\_55@mail.ru

**Д. И. Бизин**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ТЕХНОЛОГИЙ IEEE 802.11 С УЧЕТОМ ЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ**

***Аннотация.** Исследуется влияние экранирующих свойств среды на распространение сигналов беспроводной связи стандартов IEEE 802.11. В качестве материалов экранов используются различные металлы, а также двух- и трехслойные металлические конструкции. Производится расчет коэффициентов экранирования и реакции экрана. Приводятся результаты практических исследований.*

***Ключевые слова:** IEEE 802.11, экран, коэффициент экранирования поглощения, коэффициент экранирования отражения, вихревые токи, магнитная проницаемость.*

**Dmitry I. Bizin**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **RESEARCH OF THE PROCESS OF SPREAD OF IEEE 802.11 TECHNOLOGY SIGNALS TAKING INTO ACCOUNT THE SCREENING PROPERTIES OF THE MEDIUM**

***Abstract.** The influence of the shielding properties of the medium on the spread of wireless signals of IEEE 802.11 standards is investigated. Various metals, as well as two- and three-layer metal structures are used as screen materials. The coefficients of shielding and screen reaction are calculated. The results of practical research are presented.*

***Keywords:** IEEE 802.11, screen, absorption shielding coefficient, reflection shielding coefficient, eddy currents, magnetic permeability.*

Электромагнитными экранами называют конструкции, предназначенные для ослабления электромагнитных полей, создаваемых какими-либо источниками в некоторой области пространства, не содержащей этих источников [1].

Как правило, электромагнитные экраны делаются из металла: меди, алюминия, стали. Если металлическая конструкция не предназначена специально для экранирования, но попутно с выполнением своих основных функций решает и эту задачу, то говорят, что она работает как экран.

Говоря об экранах, часто подразумевают их защитную функцию, т.е.

способность экрана снижать влияние внешнего электромагнитного поля на объект связи, однако любой экран может ослаблять и полезный сигнал, если речь идет о беспроводных технологиях связи, в частности о семействе технологий IEEE 802.11, более известных как технологии Wi-Fi.

Любой электромагнитный экран может рассматриваться как система с распределенными постоянными, обладающая рядом собственных частот. Когда частота внешнего электромагнитного поля приближается к одной из собственных частот экрана и становится равной ей, эффективность экранирования резко уменьшается. Поэтому может возникнуть ситуация, при которой в результате резонансных явлений экран не только не ослабит, а даже усилит поле в защищаемой области пространства.

Экран-коробка может оказаться настроенным полым резонатором. Отверстия и щели в экране могут оказаться эффективными щелевыми антеннами. Об этом необходимо помнить при моделировании распространения беспроводных сигналов в различных средах, содержащих экраны. Экраны более эффективны, если размеры отверстий и щелей минимальны, стенки экрана заземлены и имеют достаточную толщину.

Электромагнитный экран является линейной системой, для него справедлив принцип взаимности перемещений. Данное означает, что эффективность экран-коробки сохраняется одной и той же, независимо от того, расположен ли внутри него источник поля или защищаемая область пространства.

На практике снижение уровня сигналов в беспроводных сетях периодически происходит именно по причине случайного экранирования определенных областей пространства различными металлическими конструкциями. И это зачастую приводит к ухудшению качества каналов передачи данных, которые могут использоваться для передачи различного рода трафика.

В лаборатории кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» Омского государственного университета путей сообщения были произведены практические исследования для изучения пассивного влияния экранов из различных металлов на распространение сигналов беспроводных сетей IEEE 802.11, а также расчёт коэффициентов экранирования.

Эффективность экранирования металлической поверхности определяется коэффициентом экранирования. Коэффициент экранирования для магнитного поля:

$$S_H = \frac{H_{\text{Э}}}{H}, \quad (1)$$

где  $H_{\text{Э}}$  – напряженность магнитного поля внутри экранного пространства при наличии экрана, А/м;

$H$  – напряженность магнитного поля внутри экранного пространства без экрана, А/м.

Коэффициент экранирования для электрического поля:

$$S_E = \frac{E_{\mathcal{E}}}{E}, \quad (2)$$

где  $E_{\mathcal{E}}$  – напряженность электрического поля внутри экранного пространства при наличии экрана, В/м;

$E$  – напряженность электрического поля внутри экранного пространства без экрана, В/м.

Различают три режима экранирования в зависимости от частоты поля:

- электромагнитостатический (частоты до килогерцового диапазона);
- электромагнитный (частоты килогерцового и мегагерцового диапазонов);
- волновой (частоты гигагерцового диапазона), в этом режиме длина волны соизмерима с поперечным сечением экрана, и может наблюдаться явление резонанса, связанное с резкими изменениями параметров экранирования.

Для технологий IEEE 802.11, использующих частоты 2400 – 2483,5 МГц, а также 5150 – 5350 и 5650 – 5725 МГц, имеет смысл рассматривать волновой режим.

В общем случае коэффициент экранирования определяется по формуле:

$$S = S_n \cdot S_o, \quad (3)$$

где  $S_n$  – коэффициент экранирования поглощения;

$S_o$  – коэффициент экранирования отражения.

Согласно [2], на гигагерцовых частотах коэффициент экранирования определяется, в основном, коэффициентом отражения  $S_o$ , который связан с генерацией в тонком приповерхностном слое токов той же частоты, что и воздействующее поле и, следовательно, генерацией поля противоположной направленности. Значение коэффициента поглощения  $S_n$  связано со скин-эффектом – протеканием токов высокой частоты в тонком приповерхностном слое проводника.

Коэффициент экранирования поглощения:

$$S_n = \frac{1}{ch(K_{vt} \cdot t_{\mathcal{E}})}, \quad (4)$$

где  $K_{vt}$  – коэффициент вихревых токов;

$t_{\mathcal{E}}$  – толщина экранирующего элемента.

Коэффициент вихревых токов:

$$K_{vt} = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая частота, Рад·с;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\sigma$  – удельная проводимость экранирующего материала, (Ом·м)<sup>-1</sup>.

Удельная проводимость материала определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала, Ом·м.

Абсолютная магнитная проницаемость:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_2, \quad (7)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость свободного пространства, Гн/м;

$\mu_2$  – относительная магнитная проницаемость.

Угловая частота рассчитывается по формуле:

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (8)$$

где  $f$  – частота передатчика, Гц.

Коэффициент экранирования отражения определяется по формуле:

$$S_o = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(K_{vr} \cdot t_{\text{Э}})}, \quad (9)$$

где  $Z_D$  – волновое сопротивление диэлектрика для магнитного поля, Ом;

$Z_M$  – волновое сопротивление металла, Ом.

Волновое сопротивление диэлектрика:

$$Z_D = \frac{j\omega\mu_a D_{\text{Э}}}{2}, \quad (10)$$

где  $D_{\text{Э}}$  – диаметр экранирующего элемента, м.

Волновое сопротивление металла:

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu_2}{\sigma}}. \quad (11)$$

Формула для расчета коэффициента экранирования многослойных экранов в случае применения двухслойного экрана будет иметь вид [3]:

$$S_{12} = \frac{S_1 \cdot S_2}{1 - P_1 \cdot P_2}, \quad (12)$$

где  $S_1$  – коэффициент экранирования первого слоя экрана;

$S_2$  – коэффициент экранирования второго слоя экрана;

$P_1$  – коэффициент реакции первого слоя экрана;

$P_2$  – коэффициент реакции второго слоя экрана.

Коэффициент экранирования для трехслойных экранов  $S_{123}$ , определяется по формуле [3]:

$$S_{123} = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\left( (1 - P_1 \cdot P_2) \cdot (1 - P_2 \cdot P_3) - P_1 \cdot P_3 \cdot S_2^2 \right)}, \quad (13)$$

где  $S_3$  – коэффициент экранирования третьего слоя экрана;

$P_3$  – коэффициент реакции третьего слоя экрана.

Коэффициент реакции экрана определяется по формуле:

$$P = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Z_D}{Z_M} - \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(K_{vt} \cdot t_{\text{Э}})}{1 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \cdot th(K_{vt} \cdot t_{\text{Э}})}. \quad (14)$$

Для расчета коэффициентов экранирования поглощения и отражения однослойных экранов использовались справочные данные, приведенные в табл. 1.

На частотах 2,4 и 5,15 ГГц значения коэффициентов экранирования поглощения для различных металлов стремятся к нулю, поэтому в табл. 2 не приводятся.

Таблица 1

Справочные величины

Металл	Справочные величины	
	Относительная магнитная проницаемость	Удельное сопротивление, Ом·м
Медь	0,999996	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Алюминий	1,000022	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Свинец	0,999994	$21 \cdot 10^{-8}$
Сталь (трансформаторная)	4000	$12 \cdot 10^{-8}$

Результаты расчетов коэффициентов экранирования отражения для однослойных экранов для частот 2,4 и 5,15 ГГц приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчетов для однослойных экранов

Металл	Коэффициенты экранирования отражения	
	для частоты 2,4 ГГц	для частоты 5,15 ГГц
Медь	0,0001488-j·0,0001488	0,0001016-j·0,0001016
Алюминий	0,0001910-j·0,0001909	0,0001304-j·0,0001304
Свинец	0,0005231-j·0,0005226	0,0003571-j·0,0003568
Сталь (трансформаторная)	0,0000063-j·0,0000063	0,0000043-j·0,0000043

Результаты расчетов для двух- и трехслойного экранов для частот 2,4 и 5,15 ГГц приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

## Результаты расчетов для двух- и трехслойного экранов на частоте 2,4 ГГц

Металлы	Коэффициенты			
	Реакции первого слоя $P_1$	Реакции второго слоя $P_2$	Реакции третьего слоя $P_3$	Экранирования $S$
Двухслойный экран из меди и алюминия	0,99985+j·0,00015	0,99981+j·0,00019	-	0,0000837-j·0,0000836
Трехслойный экран из алюминия	0,99981+j·0,00019	0,99981+j·0,00019	0,99981+j·0,00019	0,0000637-j·0,0000636

Таблица 4

## Результаты расчетов для двух- и трехслойного экранов на частоте 5,15 ГГц

Металлы	Коэффициенты			
	Реакции первого слоя $P_1$	Реакции второго слоя $P_2$	Реакции третьего слоя $P_3$	Экранирования $S$
Двухслойный экран из меди и алюминия	0,9999+j·0,0001	0,99987+j·0,00013	-	0,0000571-j·0,0000571
Трехслойный экран из алюминия	0,99987+j·0,00013	0,99987+j·0,00013	0,99987+j·0,00013	0,0000435-j·0,0000435

Практические исследования проводились в лаборатории с точкой доступа TP-Link TL-WR841ND и двумя USB-адаптерами D-Link DWA-125. Данное оборудование поддерживает стандарты IEEE 802.11g/n и рассчитано на работу в частотном диапазоне от 2400 до 2483,5 МГц. Спецификации IEEE 802.11 предусматривают различные методы модуляции и кодирования, среди которых можно выделить метод прямого последовательного расширения спектра DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), двоичное пакетное сверточное кодирование PBCC (Packet Binary Convolutional Coding), кодирование с использованием комплементарных кодов ССК (Complementary Code Keying), ортогональное частотное мультиплексирование OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Для проведения исследований были изготовлены экраны из рассмотренных выше материалов, толщина экранов составила 1 мм, диаметр экранирующих элементов – 18 мм.

Все измерения проводились при помощи программного обеспечения WirelessMon. Изначально измерялся уровень сигнала на открытом пространстве без препятствий, далее проводилось экранирование одного из приемопередатчиков и опять проводилось измерение уровня сигнала.

Результаты практических исследований приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значение RSSI для разных типов экранов на разных скоростях соединения

Скорость передачи, Мбит/с	RSSI, дБм					
	Без экрана	Медный экран	Алюминиевый экран	Свинцовый экран	Стальной экран	Многослойный экран
1	-45	-51	-49	-51	-51	-53
2	-45	-49	-51	-51	-51	-53
5,5	-45	-51	-51	-51	-51	-51
6	-45	-53	-53	-53	-54	-54
9	-45	-54	-56	-54	-56	-56
11	-45	-53	-53	-53	-53	-55
12	-45	-58	-59	-59	-58	-60
18	-45	-59	-60	-60	-59	-62
24	-45	-60	-61	-60	-61	-61
36	-45	-61	-63	-63	-63	-63
48	-45	-63	-65	-63	-63	-64
54	-45	-66	-65	-65	-65	-66

Исследование однослойных экранов показало, что снижение уровня сигнала происходит вне зависимости от материала экрана, все металлы показали примерно одни и те же результаты. Согласно результатам расчетов на частотах работы IEEE 802.11 экраны толщиной 1 мм вне зависимости от материала имеют коэффициент экранирования поглощения равный нулю и коэффициент экранирования отражения близкий к нулю (порядка  $10^{-4}$ ), что должно приводить к невозможности приема информации экранированным приемником. На практике же связь полностью не прекращалась даже при применении двух- и трехслойных экранов, что объясняется наличием технологических отверстий в экранирующих конструкциях (для ввода кабелей).

#### Список литературы

1. Шапиро, Д. Н. Электромагнитное экранирование / Д. Н. Шапиро. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
2. Ивко, А. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры как метод обеспечения электромагнитной совместимости / А. Ивко // Современная электроника. – 2015. – № 8. – С. 86 – 90.
3. Митрохин, В. Е. Методика оценки импульсного электромагнитного влияния на кабели аэрокосмических аппаратов / В. Е. Митрохин // Надежность функционирования систем автоматики и информационных сетей железнодорожного транспорта: Межвузовский тематический сборник научных трудов / Омская государственная академия путей сообщения. – Омск, 1995. – С. 75 – 83.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Бизин Дмитрий Игоревич**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Старший преподаватель кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: [bizin\\_dmitriy@mail.ru](mailto:bizin_dmitriy@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Bizin Dmitry Igorevich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Senior lecturer at the department  
«Telecommunication, radio engineering  
systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: [bizin\\_dmitriy@mail.ru](mailto:bizin_dmitriy@mail.ru)

**В. Е. Митрохин, П. Г. Рингенблум, И. Н. Башков**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАФИКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ**

***Аннотация.** В настоящей статье проведен краткий сравнительный анализ методов, которые возможно применить в целях прогнозирования сетевого трафика в телекоммуникационных сетях. Необходимость прогнозирования обуславливается возможностью динамического перераспределения ресурсов в современных высоконагруженных сетях. В рамках исследования сетевой трафик рассматривается как временной ряд и для прогнозирования его поведения могут быть использованы как статистические методы (ARIMA, ARFIMA, SARIMA), так и искусственные нейронные сети. Поскольку разные методы прогнозирования показывают различные результаты в зависимости от длительности периода упреждения, в данной работе проанализирована применимость каждого метода для прогнозирования трафика в зависимости от заданных условий. Определена перспектива применения статистических методов ARIMA и SARIMA для выполнения краткосрочных прогнозов, ARFIMA для долгосрочных и описаны перспективы использования в целях прогнозирования искусственных нейронных сетей в зависимости от периода упреждения.*

***Ключевые слова:** Сети широкополосного доступа, прогнозирование сетевого трафика, математическая модель, временной ряд, пропускная способность, телекоммуникационная сеть.*

**Valery E. Mitrokhin, Pavel G. Ringenblyum, Igor N. Bashkov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **ANALYSIS OF METHODS OF TRAFFIC'S PROGNOSYS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS**

***Abstract.** This paper focuses on the analysis of mathematical tools and methodological approaches to simulation of network traffic in telecommunications networks. Simulation of network traffic is actual in modern high load networks and networks with dynamic resource relocation. Traffic in telecommunication network was taken modeling process as a set of time series. Current paper presents and justifies following approaches to prognosing: statistical ARIMA, ARFIMA, SARIMA and artificial neural networks. A possibility of use those models for short- and long-term forecast was described too. Authors suggest to use ARIMA and SARIMA models for short-term prognosing, ARFIMA model for long-term prognosing. Artificial neural networks can be used in both forecast scenarios.*

***Keywords:** Broadband access networks, traffic simulation, mathematical model, time series, bandwidth, telecommunication network.*

## Постановка задачи

В настоящее время задача прогнозирования трафика в телекоммуникационных сетях является одной из наиболее актуальных. Это связано с необходимостью максимизации прибыли поставщиков услуг связи, для этой цели суммарная пропускная способность (здесь и далее под «пропускной способностью» подразумевается англоязычный термин bandwidth) абонентских линий может превосходить пропускную способность магистральных линий. Для оценки возможности наращивания абонентской базы при сохранении стабильных качественных показателей услуг связи без увеличения пропускной способности магистральных линий необходимо оперировать инструментами, способными обеспечить прогнозирование загрузки полосы пропускания с достаточной достоверностью. Во-вторых, для обеспечения заданных показателей качества обслуживания (QoS, Quality of Service) требуется также располагать сведениями о характере зависимости трафика от времени, поскольку в ряде случаев для обеспечения передачи высокоприоритетного трафика необходимо жертвовать качеством услуг связи для низкоприоритетного [13]. Поскольку эти процессы происходят не мгновенно, то наличие даже краткосрочного прогноза позволяет вовремя отреагировать на изменение ситуации и переключить режимы работы оборудования. Третьим фактором, обуславливающим необходимость исследования и совершенствование методов прогнозирования трафика в телекоммуникационных сетях, является необходимость поиска аномалий сетевого трафика, которые в свою очередь могут свидетельствовать о реализации угроз информационной безопасности. Таким образом у операторов связи появляется возможность реагировать на упреждение негативных последствий, вызванных атаками на инфраструктуру клиентов и самого оператора.

В исследованиях выделяется следующая классификация прогнозов в зависимости от возможных значения периода упреждения:

1. Краткосрочный прогноз (секунды – десятки минут).
2. Среднесрочный прогноз (десятки минут – часы).
3. Долгосрочный прогноз (десятки часов – годы).

В соответствии с выше сформулированными задачами прогнозирования трафика, наиболее востребованным является краткосрочный прогноз, который позволяет обеспечить достаточную достоверность построенной модели и удовлетворяет требованиям оперативного управления телекоммуникационной сетью.

## Трафик в телекоммуникационных сетях как временной ряд

Трафик в телекоммуникационных сетях возможно рассматривать как временной ряд [1] – данные являются последовательностью измерений, выполненных через определенные промежутки времени – то есть в виде набора данных  $x(t)$ , где  $t$  – время измерения,  $x$  – измеряемая величина объема трафика (доля использованной пропускной способности сегмента ТКС). Также трафик в сетях связи как правило обладает свойством самоподобия [2].

Для решения задачи прогнозирования временного ряда он должен обладать следующими свойствами [3]:

1. Временной ряд должен быть разделен на однородные промежутки, в пределах которых значение функции временного ряда подчиняется единому закону.
2. Значения временного ряда должны быть сопоставимы с учетом всех значимых признаков.
3. Временные промежутки, на которые делится ряд, должны соотноситься с интенсивностью процессов, которые он описывает.
4. Временной ряд должен быть непрерывным.

Выполнение вышеперечисленных условий позволяет формализовать математическую модель временного ряда, характеризующего трафик в сети, и использовать для построения прогноза широко распространенные методы математической статистики. Вследствие этого для прогнозирования целесообразно использовать семейство регрессионных математических моделей ARMA (ARIMA, SARIMA, ARFIMA).

## Статистические методы прогнозирования временного ряда

ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average, интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего) используется для прогнозирования одномерных временных рядов и представляет собой обобщение модели ARMA (Autoregressive Moving Average, модель авторегрессии – скользящего среднего) для нестационарных временных рядов. Для ее применения нестационарный временной ряд должен быть дифференцирован столько раз, чтобы его можно было принимать стационарным для дальнейшего использования модели ARMA, после чего результат восстанавливается интегрированием столько же раз, сколько он был дифференцирован [4]. В общем случае модель ARIMA записывается следующим образом (1) [5]:

$$ARIMA(p, d, q), \quad (1)$$

где  $p$  – параметры авторегрессии,  
 $d$  – порядок дифференцирования  
 $q$  – параметры скользящего среднего

В случае, когда в исследуемом ряду явно прослеживается сезонная составляющая, то для построения прогноза используется модель SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average, сезонная интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего), которая позволяет корректно учитывать данные временного ряда с компонентом сезонности (регулярно повторяющимся характером зависимости). Для этого к параметрам модели ARIMA добавляются дополнительные характеристики компонента сезонности, таким образом модель SARIMA записывается в следующем виде (2) [6]:

$$SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m, \quad (2)$$

где  $p$  – параметры авторегрессии,  
 $d$  – порядок дифференцирования  
 $q$  – параметры скользящего среднего  
 $P$  – параметры авторегрессии сезонного компонента  
 $D$  – порядок дифференцирования сезонного компонента  
 $Q$  – параметры скользящего среднего сезонного компонента  
 $m$  – число сезонов в рассматриваемом временном промежутке.

Также для решения задачи прогнозирования трафика в сетях может применяться модель ARFIMA (Autoregressive Fractionally Integrated Moving Average, частично интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего, в некоторых источниках FARIMA [7]). Фактически модель ARFIMA представляет собой классическую модель ARIMA, в которой параметр дифференцирования  $d$  может принимать дробные значения, как правило в пределах  $-0,5 < d < 0,5$  [8]. Модель ARFIMA нашла свое применение для выполнения долгосрочных прогнозов и показывает лучшие результаты, нежели ARIMA [9]. В то же время, в рамках решения задачи прогнозирования трафика на коротких временных промежутках для оперативного управления, использование данной модели прогнозирования не является обоснованным.

Прогнозирование временного ряда при помощи искусственных нейронных сетей

Отдельно стоят методы прогнозирования, опирающиеся на использование

искусственных нейронных сетей. С их помощью успешно решается целый ряд задач, в которых требуется восстановить целостную картину по неполным данным, что также находит свое применение в прогнозировании временных рядов [10]. Искусственные нейронные сети являются инструментами моделирования зависимостей, в том числе нелинейных. Основным достоинством нейронных сетей, выгодно отличающим их от статистических методов анализа, является их способность к обобщению и выявлению неявных зависимостей между входным массивом данных и получаемым на выходе результатом, что при правильном применении может значительно повысить точность прогнозирования. Для работы искусственной нейронной сети требуются наборы данных и выбор корректной топологии (схемы расположения и связей персептронов друг с другом). Для корректного функционирования искусственной нейронной сети необходимо провести ее предварительное обучение на данных, аналогичных используемым для решения задачи прогнозирования. Таким образом нейронная сеть получает возможность предсказания будущих значений на основании ранее полученных и обработанных данных, что позволяет успешно решать задачу прогнозирования временного ряда.

В практике прогнозирования временных рядов с использованием искусственных нейронных сетей прогноз выполняется на один отсчет времени вперед путем анализа  $\tau$  предыдущих значений. В данном случае входным значением для нейронной сети является следующий вектор (3):

$$x(t) = (x_{t-\tau+1}, x_{t-\tau+2}, \dots, x_t), \quad (3)$$

где  $\tau$  – ширина окна анализа

$t$  – текущий момент времени.

Результатом работы на выходе нейросети является значение  $x_{t+1}$ . Схему функционирования искусственной нейронной сети в таком случае можно описать следующим образом [11].

1. Исходя из производительности системы и доступного на обучение времени выбирается параметр  $\tau$  – ширина окна анализа (сколько предыдущих значений будет обработано на каждом шаге прогнозирования).

2. Временной ряд раскладывается на множество, состоящее из примеров, на которых будет в дальнейшем производиться обучение нейронной сети (эмпирическое правило – массив данных для обучения должен быть намного больше, чем число факторов, влияющих на конечный результат).

3. Определяется структура нейронной сети – число входов в зависимости от величины  $\tau$ , промежуточные слои и число выходов.

4. Проводится обучение нейронной сети на обучающей выборке, сформированной из временного ряда, значения которого в дальнейшем должны прогнозироваться. Для этого задается массив обучающих примеров, где для  $i$ -го примера набор значений будет выглядеть следующим образом (4):

$$\begin{cases} x(i) \\ x(i+1) \\ \dots \\ x(i+\tau-1) \end{cases} \quad (4)$$

где  $x(i+\tau-1) = x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+\tau-1}$ .

Обязательным условием успешного обучения (и, следовательно, дальнейшего выполнения функции прогнозирования) является репрезентативность временного ряда, на котором производится обучение нейросети. Также в обучающей выборке должна присутствовать сезонность и выбросы (если один или оба этих фактора присутствуют в исследуемом временном ряду изначально) [12].

#### Выводы и заключение

На основании вышеизложенного, в настоящее время для решения задачи прогнозирования трафика в телекоммуникационных сетях успешно используются как статистические методы, так и искусственные нейронные сети. При этом применимость того или иного метода или математической модели зависит от целого ряда факторов:

Таблица 1

Сводный анализ методов прогнозирования трафика в телекоммуникационных сетях

№	Метод прогнозирования	Краткосрочный / Долгосрочный	Примечание
1	Статистический - ARIMA	Краткосрочный	
2	Статистический - SARIMA	Краткосрочный	Используется вместо ARIMA при наличии во временном ряду сезонной составляющей
3	Статистический - ARFIMA	Долгосрочный	
4	Искусственная нейронная сеть	Краткосрочный, долгосрочный	Наилучший результат достигается при наличии во временном ряду сезонной составляющей

Для решения задачи среднесрочного прогнозирования сетевого трафика в телекоммуникационных сетях допускается использование любого из вышеперечисленных методов, однако определение наиболее эффективного (достаточно точного и быстрого) метода является темой отдельного исследования и выходит за рамки настоящей работы.

В связи с взрывным ростом вычислительной мощности и появлением процессорных систем, ориентированных на высокоэффективное выполнение задач обучения искусственных нейронных сетей, перспектива их использования для решения задач оперативного прогнозирования (краткосрочный прогноз) трафика в телекоммуникационных сетях становится реальной. На момент написания и публикации настоящей работы авторам неизвестно о подобных решениях, но в долгосрочной перспективе использование искусственных нейронных сетей будет все более расширяться, в том числе и для прогнозирования сетевого трафика. По мнению авторов данное направление является наиболее перспективным и заслуживающим детального изучения в сравнении с традиционными статистическими методами.

#### Список литературы

1. Sangjoon, J. A prediction method of network traffic using time series models / J. Sangjoon, K. Chonggun, C. Younky // *Computational Science and Its Applications*. – 2006. – С. 234 – 243.
2. Городецкий, А. Я. Фрактальные процессы в компьютерных сетях: Учебное пособие / А. Я. Городецкий, В. С. Заборовский. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 102 с.
3. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; Пер. с англ. Под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974 – 406 с.
4. Гребенников, А. Моделирование сетевого трафика и прогнозирование с помощью модели ARIMA / А. Гребенников, Ю. Крюков, Д. Чернягин // *Системный анализ в науке и образовании*. – 2011. – №1. – С. 7 – 17.
5. Евсеев, Е. А. Эконометрика: Учебное пособие для бакалавриата и специалитета / Е. А. Евсеев, В. М. Буре. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 186 с.
6. Hyndman, R. J. Forecasting: principles and practice / R. J. Hyndman. – OTexts, 2013. – 292 с.
7. Shu, Y. Traffic prediction using FARIMA models / Y. Shu, Z. Jin, L. Zhang, L. Wang, O.W. Yang // *Communications* – 1999 – Т. 2. – С. 891 – 895.
8. Монахов, Ю. М. Использование FARIMA-модели для описания и предсказания поведения сети передачи данных в условиях атак типа «отказ в обслуживании» / Ю. М. Монахов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2008. – № 10. – С. 133 – 136.
9. Cowpertwait, P.S.P. Introductory Time Series with R / P. S. P Cowpertwait, A. V. Metcalfe. – Springer, 2009. – 272 с.

10. Крючин, О. В. Прогнозирование валютных пар с помощью искусственной нейронной сети / О. В. Крючин, А. А. Арзамасцев // Вестник ТГУ. – 2009. – №3. – Т.14. – С. 591 – 596.

11. Rutka, G. Network Traffic Prediction using ARIMA and Neural Networks Models / G. Rutka // Electronics and Electrical Engineering. – 2008. – Т. 4. – С. 47 – 52.

12. Костина, Л. Н. Нейронные сети в задачах прогнозирования временных рядов // Л. Н. Костина, Г. А. Гареева // Международный научный журнал «Инновационная наука» / Уфа: Аэтерна. – 2015. – № 6. – С. 70 – 73.

13. Митрохин, В. Е. Анализ и сравнение методов обеспечения качества обслуживания потоков мультисервисной сети / В. Е. Митрохин, Е. Д. Бычков, О. Н. Коваленко // Автоматика, связь и информатика. – 2008. – №7. – С.21 – 22.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

### **Митрохин Валерий Евгеньевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Д.т.н., профессор кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: mitrokhin@list.ru

### **Рингенблум Павел Генрикович**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: win32conficker@gmail.com

### **Башков Игорь Николаевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Аспирант кафедры «Телекоммуникационные,  
радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: ingvarrbashkov@gmail.com

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

### **Mitrokhin Valery Evgenievich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Doctor of Technical Sciences, Professor at the  
department «Telecommunication, radio  
engineering systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: mitrokhin@list.ru

### **Ringenblum Pavel Genrikovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Candidate of Technical Sciences  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: win32conficker@gmail.com

### **Bashkov Igor Nikolaevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Graduate student at the department  
«Telecommunication, radio engineering  
systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: ingvarrbashkov@gmail.com

**Н. Е. Агарков**

АО «ОНИИП», г. Омск, Российская Федерация

## **ШИРОКОПОЛОСНЫЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

***Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы о контроле параметров среды передачи в телекоммуникационных системах, которые обуславливают возможности и качество передачи информации по направляющим системам в широком спектре частот. Поднимается актуальный вопрос о том, что производители кабельной продукции зачастую приводят значения параметров среды передачи на одной или двух частотах, а не в широком спектре.*

*Предлагается измерение величины диэлектрической проницаемости изоляции кабелей на этапе проектирования телекоммуникационных систем. Приводятся результаты измерений диэлектрической проницаемости образцов радиочастотных кабелей РК-75-4-12, РК-75-4-21, а также стеклотекстолита FR-4 в широком диапазоне частот, а также приводятся значения вычисленного на основе полученных данных волнового сопротивления кабелей и линий передачи, основанных на подложке печатной платы.*

***Ключевые слова:** контроль параметров, среда передачи, линия передачи, диэлектрик, параметры изоляции, волновое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, высокая частота, спектр частот.*

**Nikita E. Agarkov**

JSC "ONIP", Omsk, the Russian Federation

## **WIDEBAND MONITORING AND MEASUREMENT OF TRANSMISSION MEDIA PARAMETERS IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

***Abstract.** The article presents questions about the control of environmental parameters in telecommunication systems, which determine the capabilities and quality of information transfer along the guiding systems in a wide range of frequencies. A relevant, relevant question is that cable products often drive data transfer parameters at one or two frequencies, rather than over a wide range.*

*The measurement of the dielectric constant of cable insulation at the design stage of telecommunication systems is provided. The results of measurements of the dielectric constant of samples of radio-frequency cables RC-75-4-12, RC-75-4-21, as well as FR-4 fiberglass in a wide frequency range, are also presented, and values calculated on the basis of the received wave impedance signals of cables and lines are also given transmission. based on the substrate of the printed circuit board.*

***Keywords:** control parameters, transmission medium, transmission line, dielectric, insulation parameters, wave resistance, permittivity, high frequency, frequency spectrum.*

Построенная и ныне функционирующая сеть железнодорожного транспорта России ориентирована на аналоговые системы приема и передачи информации. В последние годы на железных дорогах РФ наблюдается интенсивный переход с устаревшей аналоговой аппаратуры на современную цифровую, т. е. происходит цифровизация сети. В связи с этим частотный спектр каналов и сред передачи резко расширяется, поэтому специалистам требуется знать параметры кабельных линий и систем передачи информации в широком диапазоне частот. Основным параметром, определяющим физическую дальность приема и передачи информации, а также спектр рабочих частот для кабельных линий и аппаратуры, является величина относительной диэлектрической проницаемости материалов изоляции кабелей и подложек печатных плат. Параметры среды передачи направляющей системы являются основными характеристиками при разработке широкополосных радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Актуальность темы определяется тем, что в настоящее время происходит резкое расширение спектра передаваемых частот в гигагерцовую область, а существующие ГОСТы и справочники по параметрам среды передачи [1 – 3] не приводят данные по параметрам направляющих систем (проводимость  $\sigma$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , магнитная проницаемость  $\mu$ ) в широком диапазоне частот. В данной работе рассматривается величина действительной составляющей диэлектрической проницаемости, которая напрямую влияет на затухание в направляющих системах (например, печатные платы или коаксиальные кабели), на скорость распространения волн в среде (задержку сигнала при распространении в среде), на импеданс схемы, на ёмкость слоев печатной платы или погонную ёмкость кабеля и на ряд других параметров.

Величина  $\epsilon$  зависит, во-первых, от материала и его химического состава, во-вторых, от технологии производства и от партии к партии (в меньшей степени), в-третьих, от частоты передаваемого сигнала, в-четвертых, от внешних физических условий среды. Поэтому авторами разрабатывается установка по определению величины  $\epsilon$  изоляции кабелей телекоммуникаций и печатных плат с помощью конденсаторного метода [4]. В качестве образца для измерения может быть взят отрезок коаксиального кабеля, витая пара, двухсторонний фольгированный текстолит, рассматривается возможность подключения образцов металлокерамики.

Схема установки для измерения величины  $\epsilon$  показана на рис. 1. Работа установки основана на усовершенствованном конденсаторном методе [4, 5], т.е. наблюдении изменения между емкостью конденсатора до помещения между ними исследуемого образца и после. В качестве конденсатора с воздушными обкладками выступает резистор  $R_1$  с известным сопротивлением. Емкость конденсатора  $C$

вычисляется по известным геометрическим размерам конденсатора (плоского, коаксиального, симметричного) и известной частоте сигнала. Резистор  $R_2$  необходим для согласования выходного сопротивления генераторного оборудования с входным сопротивлением установки (50 Ом). Установка имеет два коаксиальных входа  $XP_1$  и  $XP_2$ , переключаемые через тумблер  $SA$ .  $PV_1$  – измерительное оборудование для снятия величины напряжения с элементов. Остальные элементы на схеме представляют собой паразитные элементы, образованные дорожками самой печатной платы установки.

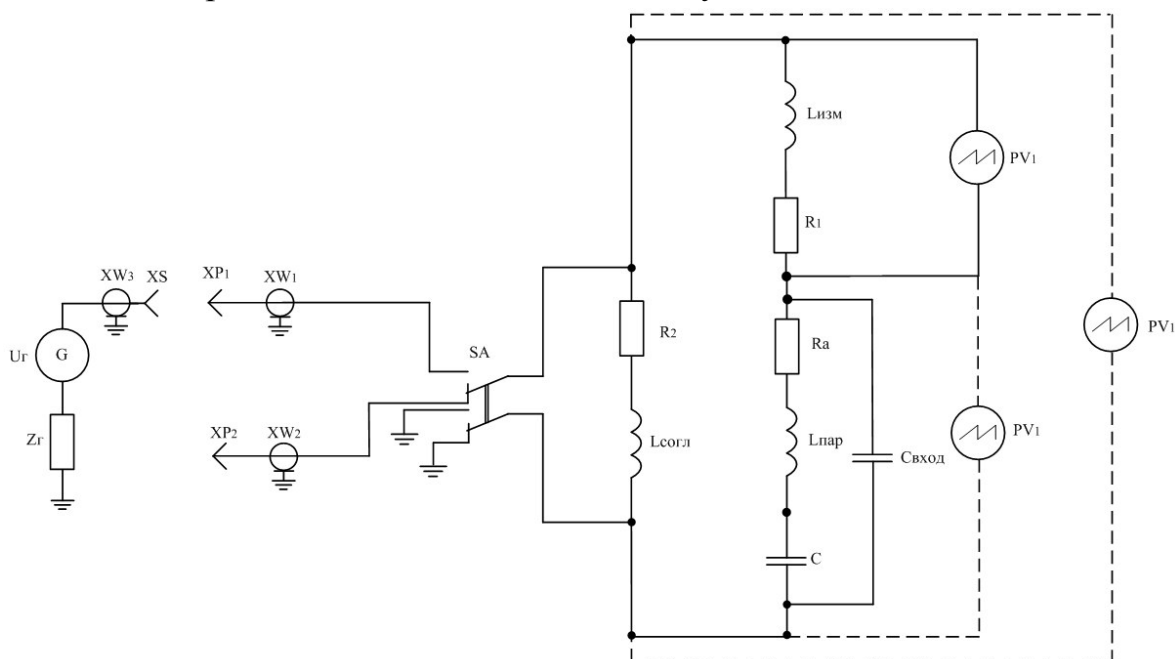


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для определения  $\epsilon$  изоляции телекоммуникационных кабелей и печатных плат

Конденсаторный метод и его ограничения подробно описаны в работах [4, 5]. На данной установке проводились измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 10 Гц – 115 МГц фольгированного стеклотекстолита FR-4, а также радиочастотных кабелей РК-75-4-12 с полиэтиленовой изоляцией и РК-75-4-21 с тефлоновой изоляцией, характеристики которых сведены в табл. 1.

На рис. 2 приведен график зависимости диэлектрической проницаемости коаксиального кабеля РК-75-4-21 с тефлоновой изоляцией от частоты в широком диапазоне частот. Экспериментальные данные получены на поверенном и аттестованном оборудовании. В качестве генераторов сигналов использовались ГЗ-112, R&S SMB100A. В качестве измерителя напряжения использовались осциллографы АКТАКОМ ADS-2221mV (РК-75-4-12), а также Tektronix MSO-2024 (FR-4 и РК-75-4-21) с полосой пропускания 200 МГц.

## Характеристики использованных кабелей, печатных плат и материалов

Параметр	РК-75-4-12	РК-75-4-21
Диаметр жилы, мм	0,78	0,85
Диаметр по изоляции жилы, мм	4,6	4,6
Диаметр оплетки, мм	0,12	0,12
Внешний диаметр, мм	7	5,9
Материал жилы	Медь	Посеребренная медь
Материал внешней изоляции	Светостабилизированный полиэтилен	Стекловолокно, пропитанное кремнийорганическим лаком
Волновое сопротивление кабеля, Ом	$75 \pm 2$	$75 \pm 3$
Погонная емкость, пФ/м	67	63
Диэлектрик вокруг жилы	Полиэтилен	Тефлон (Ф-4)
Справочная диэлектрическая проницаемость изоляции, ед.	1,9-2,4	1,9-2,2
Коэффициент укорочения, ед.	1,52	1,41

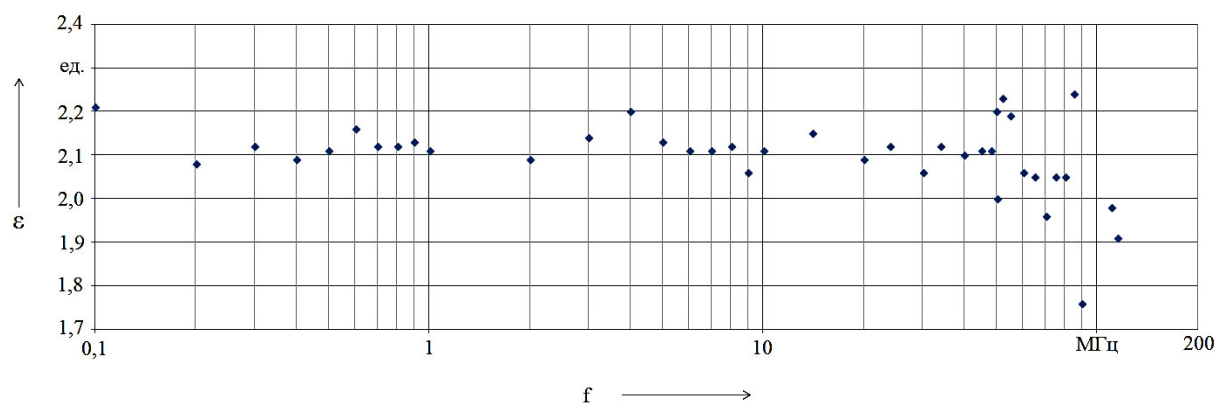


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости изоляции кабеля РК-75-4-21 от частоты

Величина  $\epsilon$  тефлона находится в пределах 1,9-2,2 ед. из-за различного химического состава, но имеет температурную зависимость и с ростом температуры нелинейно уменьшается.

Исходя из экспериментальных данных, рассчитаем величину коэффициента укорочения, значение волнового сопротивления, а также вычислим погонную емкость образца, воспользовавшись формулой для цилиндрического конденсатора [6]. Результаты сведем в табл. 2. Справочные геометрические характеристики кабелей приведены в табл. 1.

Далее был измерен образец радиочастотного кабеля РК-75-4-12 [7], график зависимости  $\epsilon$  которого представлен на рис. 3. Цифрами обозначены номиналы измерительных резисторов установки, применявшихся в качестве R1, подобранные

так, чтобы на самой низкой частоте можно было четко зафиксировать падение напряжения на нем, когда измеряемый образец обладает очень высоким импедансом. Цифра 1 – резистор 106 Ом, 2 – 105 Ом, 3 – 270 Ом.

Полиэтиленовая изоляция, применяющаяся в кабеле РК-75-4-12 имеет диэлектрическую проницаемость, находящуюся в пределах 2,1 – 2,4 ед. На основе полученных данных рассчитаем величину коэффициента укорочения, значение волнового сопротивления, а также вычислим погонную емкость образца. Результаты также сведем в табл. 2.

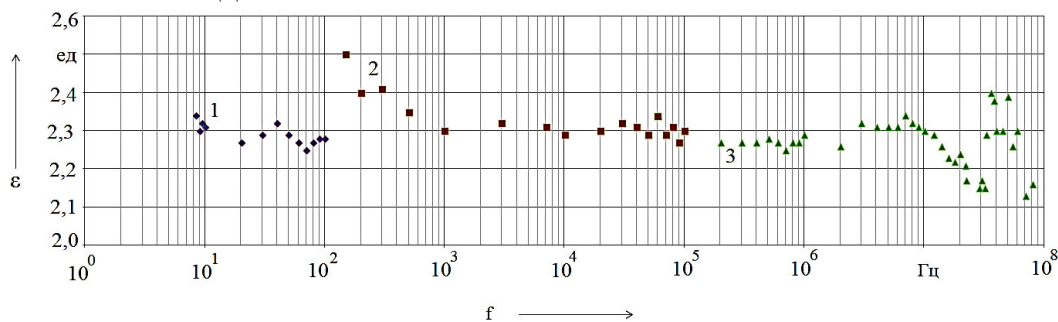


Рисунок 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости изоляции кабеля РК-75-4-12 от частоты

Погрешность измерения величины  $\epsilon$  в диапазоне частот 20-30 МГц (рис. 3) превышает 10%, что, возможно, связано с применявшимся для измерений осциллографом ADS-2221mV, который не относится к классу профессионального оборудования.

Таблица 2

Экспериментальные и справочные характеристики кабелей

Параметр	РК-75-4-12		РК-75-4-21	
	Эксперимент	ГОСТ	Эксперимент	ГОСТ
Коэффициент укорочения, ед.	1,52	1,52	1,45	1,41
Погонная емкость, пФ/м	71	67	69	63
Волновое сопротивление, Ом	71,2	75±2	69,9	75±3

Из табл. 2 следует, что на практике характеристики данных кабелей несколько отличаются от паспортных. Особенно важно это отличие по волновому сопротивлению от номинала, которое приведет к неполному согласованию линии передачи и связевой аппаратуры.

На рис. 4 покажем зависимость диэлектрической проницаемости круглого образца двухстороннего фольгированного стеклотекстолита FR-4 от частоты. Рисунок 4 показывает, что диэлектрическая проницаемость FR-4 с частот в десятки герц до ста килогерц находится на уровне 5,2 ед., а с дальнейшим повышением частоты начинает снижаться, и на частоте 100 МГц составляет уже 4,7 ед. Как показывают другие эксперименты [8], на частотах в сотни

мегагерц величина  $\epsilon$  стеклотекстолита продолжает снижаться такими же темпами, что понижает волновое сопротивление линий передачи, основанных на подложках печатных плат на 10 и более процентов, в зависимости от качества стеклотекстолита.

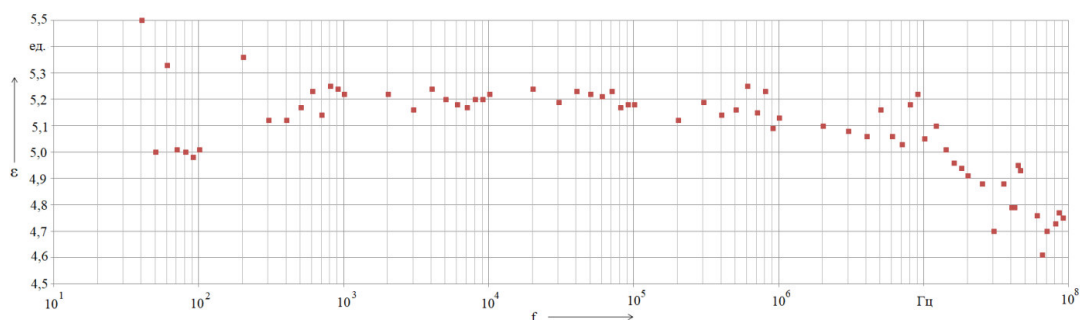


Рисунок 4 – Зависимость диэлектрической проницаемости стеклотекстолита FR-4 от частоты

В табл. 3 представлены результаты расчета волнового сопротивления копланарной линии передачи, основанной на подложке печатной платы. Разница между величиной волнового сопротивления на низких частотах и на высоких в несколько сотен мегагерц составляет более 13%, что достаточно много и непосредственно влияет на согласование с аппаратурой.

Таблица 3

Расчетные значения копланарной (полосковой) линии на подложке печатной платы

Параметр	Значение			
	1	10	100	-
Частота, МГц				
Величина $\epsilon$ , ед.	5,13	5,0	4,65	4,0
Волновое сопротивление $Z_w$ , Ом	55,8	56,6	58,7	63,3

В заключение отметим, что без знания параметров изоляции направляющих систем в широком спектре частот невозможно обеспечить качественное согласование и оценить возможность съема информации с кабелей через частичные емкости, а также оценить количественно затухание сигнала в кабелях связи. Проектируемая авторами установка для определения параметров изоляции фидеров от частоты может применяться и для изучения их свойств от изменения температуры, что является одним из важнейших факторов при эксплуатации приемопередающей аппаратуры в изменяющихся климатических условиях.

#### Список литературы

1. Физические величины: Справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Справочник по электротехническим материалам. / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – Т. 1. – 367 с.

3. Электротехнический справочник / Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского [и др.]. – М.: Энергия, 1980. – Т. 1. – 520 с.

4. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 406с.

5. Основы диэлектрической спектроскопии: Учебное пособие / Под ред. Гусева Ю. А. Казань, 2008. – 112 с.

6. Справочник по физике / Х. Кухлинг; Пер. с нем., под ред. Е. М. Лейкина. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

7. ГОСТ 11326.9-79 Кабель радиочастотный марки РК 75-4-12. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режи доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200012021> (Дата обращения: 03.09.2019).

8. Бобров П. П. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости листовых диэлектриков в диапазоне частот от 3 кГц до 300 МГц / П. П. Бобров, С. П. Кривальцевич // Техника радиосвязи. – 2017. – №3. – С. 62 – 71.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Агарков Никита Евгеньевич**  
АО «ОНИИП».  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.  
Аспирант кафедры экспериментальной  
физики и радиофизики ОмГУ.  
Тел.: +7(3812) 32-36-24.  
E-mail: agarkov.nikita@gmail.com

#### **INFORMATION ABOUT AUTHOR**

**Agarkov Nikita Evgenievich**  
JSC “ONIP”.  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.  
Postgraduate student, Department of  
Experimental Physics and Radiophysics Omsk  
State University.  
Phone: +7(3812) 32-36-24.  
E-mail: agarkov.nikita@gmail.com

УДК 654.9

#### **А. С. Стельмашук**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

### **ЦИФРОВАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА: ПЕРЕХОД ОТ GSM-R К LTE-R**

*Аннотация.* В данной статье описывается проблема перехода от сети с использованием технологии GSM-R на технологию LTE-R. Описываются возможности, архитектура, внедрение обеих технологий, их сравнение. Также частично затрагивается тема цифровой дороги будущего, где возможна интеграция всех доступных на данный момент времени технологий.

*Ключевые слова:* Радиосвязь, обеспечение движения поездов, сигнализация, организация связи между подвижными составами с диспетчером, связь при высокоскоростном движении.

## **DIGITAL RAILWAY: THE TRANSITION FROM GSM-R TO LTE-R**

**Abstract.** *This article describes the problem of transition from a network using GSM-R technology to LTE - R. It describes the capabilities, architecture, implementation of both technologies, their comparison. The topic of the digital road of the future, where integration of all currently available technologies is possible, is also partially touched upon.*

**Keywords:** *Radio Communication, provision of train traffic, signaling, organization of communication between rolling stock with the dispatcher, communication in high-speed traffic.*

В настоящее время внедряется Европейская система управления железнодорожным движением (European Railway Traffic Management System, ERTMS), которая состоит из двух частей:

- 1) Европейская система управления движением поезда (European Train Control System, ETCS), стандарт для управления движением поездов в кабине;
- 2) GSM-R – это стандарт мобильной связи GSM для железнодорожных перевозок. GSM-R обеспечивает защищенную голосовую связь и передачу данных между железнодорожными службами и поездами [1].

Для системы GSM-R выделена полоса шириной 4 МГц в диапазоне 876 – 880 МГц для передачи от подвижной к базовой станции и 921 – 925 МГц для передачи от базовой к подвижной станции. В этой полосе можно разместить до 19 временных каналов полосой по 200 кГц с частотно-временным разделением [2].

GSM-R используется в Европейских странах в таких как: Австрия, Бельгия, Чехия, Дания, Финляндия, Швеция, Швейцария, Германия, Франция, Великобритания. А также и в Африке, Индии, Китае, Саудовской Аравии, Турции и в Австралии [3] (рис. 1).

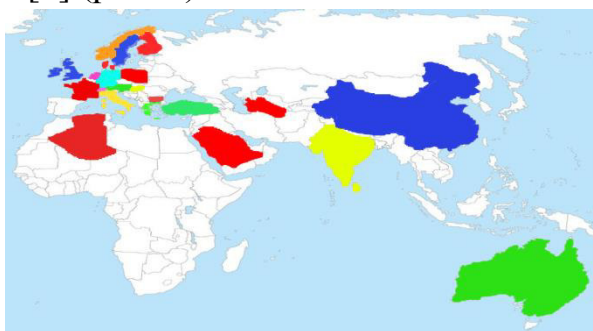


Рисунок 1 – Страны, где есть GSM-R

Традиционная система сигнализации использует метод фиксированных блоков (*Fixed Block Signaling*). Блок определяет расстояние между двумя

сигналами. Блоки предотвращают соударение поездов: только один поезд может находиться в блоке (рис. 2).

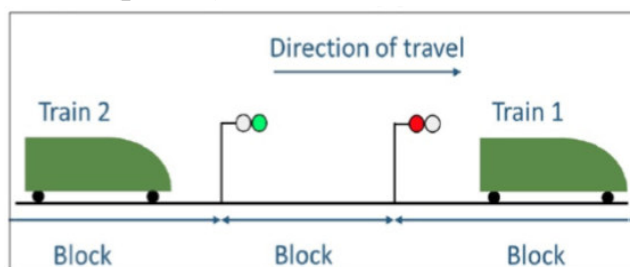


Рисунок 2 – АЛС

Технология *ETCS* может внедряться постепенно в три этапа: *Level 1*, *Level 2* и *Level 3*. В системе *ERTMS* для управления поездом выделяются три составные части:

- 1) компьютер в кабине машиниста, который связан с терминалом *GSM-R*, установленном на поезде,
- 2) теги (*balises*) или, другими словами, путевые приемопередатчики, по которым определяются: местоположение и скорость поезда, а также характеристики пути в данном месте: кривизна пути, ограничения по скорости и т.д.,
- 3) система непрерывной радиосвязи *GSM-R* между поездом и центром управления.

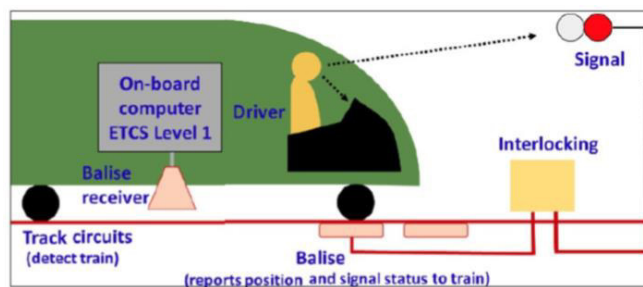


Рисунок 3 – *Level 1 ETCS*

*Level 1*: оборудование на путях отвечает за обнаружение движения поезда и выдает сигналы блокировки (*interlocking*).

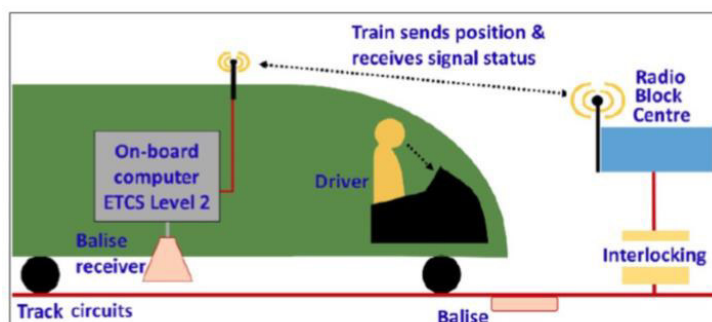


Рисунок 4 – *Level 2 ETCS*

*Level 2*: то же, что и на *Level 1*, за исключением того, что поезда постоянно получают сигналы из центра управления по радиосети *GSM-R*. Наличие поезда на путях (с учетом длины состава поезда) по-прежнему определяет оборудование на путях (*track circuits*).

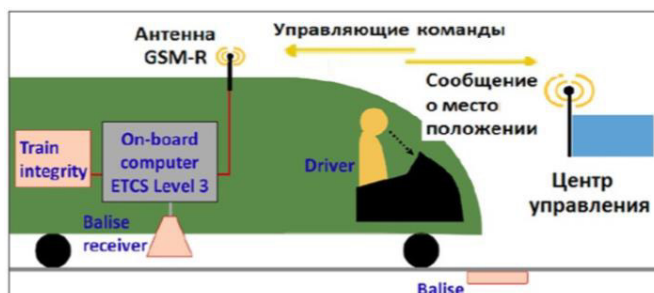


Рисунок 5 – *Level 3 ETCS*

*Level 3*: бортовой компьютер ETCS получает сигналы от тегов (*balises*), а движение поезда определяют команды из центра управления.

Какие появились новые возможности после введения *GSM-R* в *ETCS*:

- Увеличивается пропускная способность на 40% за счет метода *CBTC* (*Communication Based Train Control*). Тут вводится понятие *Moving block signalling* (Перемещающиеся блоки сигнализации), т.е. рассчитывается безопасное расстояние между двумя подвижными составами, которые движутся друг за другом.

- Отказ от аналоговой сигнализации. Это вытекает из предыдущего пункта, т.к. как все расчеты происходят в диспетчерском центре.

Внедрение технологии *ETCS* требует больших денежных вложений и времени. Например, в Великобритании начальная программа *Digital Network Rail* изначально планировалась на целых 50 лет. Сейчас же реализуется план перехода на технологию *ETCS Level 2* в течение 25 лет, и обсуждаются планы ускорения – развертывания технологии *ETCS Level 3* в течение 15 лет.

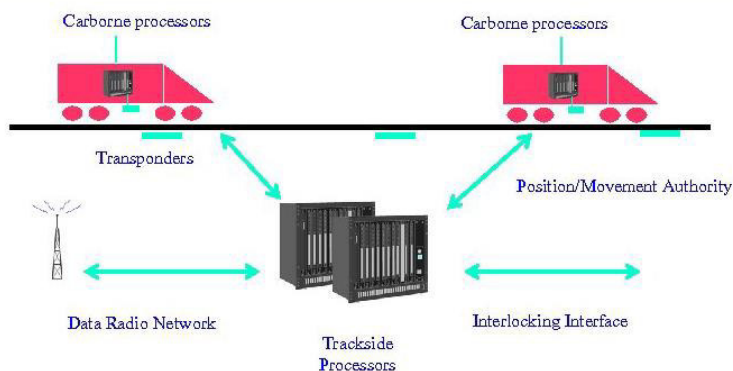


Рисунок 6 – *Communication Based Train Control*

Если описать простой схемой организацию сети *GSM-R*, тогда она будет выглядеть следующим образом.

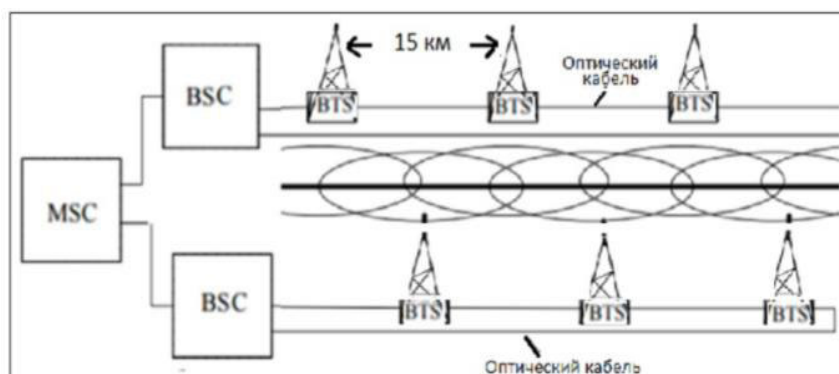


Рисунок 7 – Упрощенная схема организации GSM-R

На железной дороге требуется обеспечить высокие требования по надежности связи при высоких скоростях движения (до 500 км/ч). Поэтому радиовышки *BTS* устанавливаются с 50%-м перекрытием зон соседних сот. В результате, расстояние между соседними вышками вдоль дороги составляет всего 7 – 15 км. Вдоль дороги проложены две пары оптических кабелей (тоже для надежности) для подключения двух рядов *BTS*. По требованию организации связи поездная бригада должна иметь соединение с центром управления непрерывно. В противном случае при потере связи поезд останавливается.

Если рассмотреть детально, то схема выглядит следующим образом [4] (рис. 8):

1. Базовая приемо-передающая станция БПС (*BTS*) обеспечивает радиосвязь в определенной зоне.

2. Контроллер базовой станции КБС (*BSC*) выполняет функции управления распределением каналов, контроля соединения и регулировки очередности каналов, модуляции и демодуляции сигналов.

3. Центральный коммутатор подвижной связи ЦКП (*MSC*) обслуживает группу зон и обеспечивает все виды соединений с мобильными станциями. ЦКП осуществляет постоянное наблюдение за мобильными станциями, используя:

3) Регистр положения РМП (*HLR*), в котором содержится та часть информации о местоположении какой-либо мобильной станции, которая позволяет центральному коммутатору доставить вызов.

4) Регистр перемещения РП (*VLR*) — второе основное устройство, обеспечивающее контроль за передвижением мобильных станций из зоны в зону.

5) Центр аутентификации ЦА (*AUC*) состоит из нескольких блоков и формирует ключи и алгоритмы аутентификации. С его помощью проверяются

полномочия абонента и осуществляется его доступ к сети.

6) Регистр идентификации оборудования РИО (*EIR*) содержит централизованную базу данных для подтверждения подлинности международного идентификационного номера оборудования мобильной станции.

7) Регистр идентификации сети РИС (*IN*) содержит идентификаторы всех сетей, с которыми обеспечивается роуминг в данной системе.

8) Центр управления и обслуживания ЦУО (*ОМС*) обеспечивает управление элементами сети и качеством ее работы.

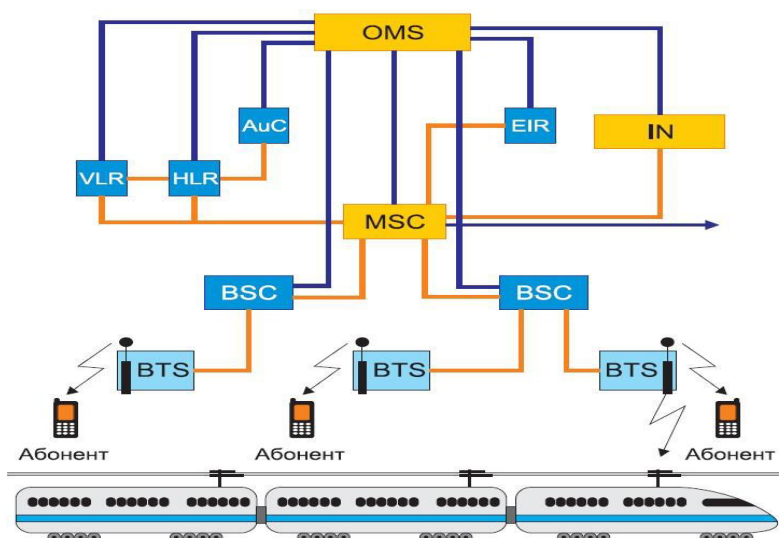


Рисунок 8 – Архитектура GSM-R

## СЕРВИСЫ GSM-R

Организованы такие сервисы как:

1) Каждому абоненту присваивается «функциональный» номер;

2) Приоритет обслуживания этих номеров. 5 уровней:

0- наивысший (аварийные вызовы);

3) *PtP Call (Point-to-Point Call)* – обычный вызов, как в сети GSM;

4) *VGCS (Voice Group Call System)* – групповой вызов (в каждый момент говорит только один из группы);

5) *VBS (Voice Broadcast System)* – режим вещания: один говорит, все остальные слушают;

6) *REC (Railways Emergency Call)* – экстренный вызов по управлению движением (типа *VGCS*) с префиксом 299, обладает высшим приоритетом (0);

7) *SEC (Shunting Emergency Call)* – экстренный вызов эксплуатации (типа *VGCS*) с префиксом 599, обладает высшим приоритетом (0);

8) адресация в зависимости от местоположения вызывающего абонента (*Location Dependent Addressing, LDA*).

## Сеть *LTE* на железной дороге

*LTE* (*Long-Term Evolution*, часто обозначается как *4G/LTE*) – стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных для мобильных телефонов и других терминалов, работающих с данными. Он основан на сетевых технологиях *GSM* и *UMTS*, но работает полностью в области пакетной коммутации, пользуясь новыми протоколами сигнализации *SIP* и *LTE*. На *LTE* может обеспечиваться скорость до 3 Гбит/с.

Как выглядит архитектура *LTE-R* [5]:

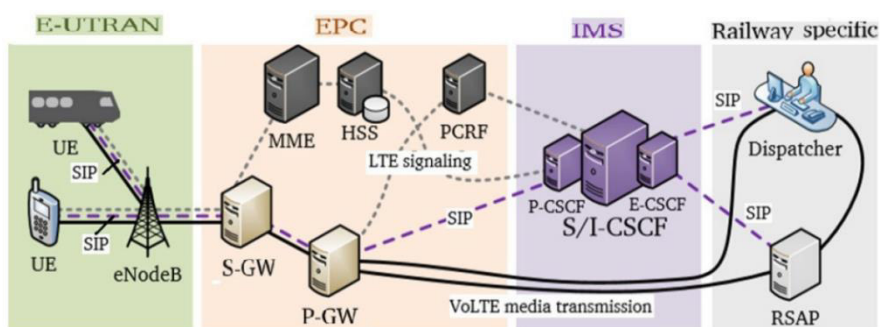


Рисунок 9 – Архитектура *LTE-R*

Сеть *LTE* построена как совокупность новых базовых станций *eNB* (*Evolved NodeB* или *eNodeB*), *eNB* подключены к *EPC*.

Ядро сети *EPC* (*Evolved Packet Core*) в своем составе содержит обслуживающий шлюз *S-GW* (*Serving Gateway*), шлюз для выхода на пакетные сети *P-GW* (*Packet Data Network Gateway*), структуры управления по протоколу *Mobility Management MME* (*Mobility Management Entity*), связанной с *S-GW* и *eNodeB* сигнальными интерфейсами.

*eNodeB* объединяет в себе функции базовых станций и контроллеров сетей 3-го поколения:

- обеспечивает передачу трафика и сигнализации по радиоканалу;
- управляет распределением радиоресурсов;
- поддерживает синхронизацию передач и контролирует уровень помех в соте;
- поддерживает услуги мультимедийного вещания.

Функции обслуживающего шлюза *S-GW*:

- маршрутизация передаваемых пакетов данных;
- установка качественных показателей (*Quality of Service, QoS*) предоставляемых услуг;
- буферизация пакетов для *UE*, пребывающих в состоянии *Idle Mode*;
- предоставление учетных данных для тарификации и оплаты выполненных услуг.

Функции *P-GW* (*Packet Data Network Gateway*)

Шлюз для выхода на пакетные сети *P-GW* организует точку доступа к внешним IP-сетям. Следственно *P-GW* является якорным шлюзом для обеспечения трафика.

*Policy and Charging Resource Function (PCRF)* представляет собой управляющий сервер, который обеспечивает централизованное управление ресурсами сети, учет и тарификацию предоставляемых услуг. Как только появляется запрос на новое активное соединение, эта информация поступает на *PCRF*. Он оценивает имеющиеся в его распоряжении ресурсы сети и направляет в *PCEF* шлюза *P-GW* команды, которые устанавливают требования к качеству услуг и к их тарификации.

Какие нововведения принесет *LTE-R*?

- 1) Увеличится скорость передачи как на прием, так и на передачу;
- 2) Пульт управления машиниста станет компактнее;
- 3) Оборудование, которое стоит на перегоне интегрируется в одно;
- 4) Расширение полосы передачи данных позволит устанавливать датчики в локомотивах, вагонах;
- 5) Появится возможность для видеоконференции;
- 6) Так как все рабочие единицы железной дороги будут связаны одной сетью, будут приходить оповещения о приближении поезда;
- 7) Появится возможность организации видеонаблюдения внутри составов
- 8) А также видеонаблюдения вдоль железнодорожного участка
- 9) Будут доступны такая дополнительная услуга для пассажиров как интернет.

Если всё так здорово, почему эту систему не вводят в эксплуатацию? Основная причина этого необходимость больших инвестиций и подстройка инфраструктуры. Но это не значит, что никто не хочет эту систему вводить.

Летом 2018 года в Южной Корее ввели использование *LTE-R*. Испытания прошли успешно и можно наблюдать следующие сравнительные характеристики.

Сопоставление GSM-R и LTE-R

Категория	GSM-R	LTE-R
Охват	• Глобальный (Европа, Китай и т. д.)	• Республика Корея (первая в мире LTE-R для скоростной железной дороги на линии Вончжу-Каннын)
Пропускная способность	• Макс. 172 кбит/с (DL), 172 кбит/с (UL)	• В среднем DL 40 Мбит/с, UL 20 Мбит/с ※ ширина полосы 10 МГц
Услуга	• Голос и передача данных с низкой скоростью (Уровень II ETCS/ERTMS голос PTT, не стандарт)	• Голос, видео, передача данных с высокой скоростью (видео+голос PTT, стандарт MCPTT, MCPTT QCI69/Signaling, 65/Voice, 70/File applied) • Функциональная и зависящая от местоположения адресация

Рисунок 10 – Сравнительная характеристика *LTE-R* и *GSM-R*

Далее представлен план развития *LTE-R* до 2027 года.

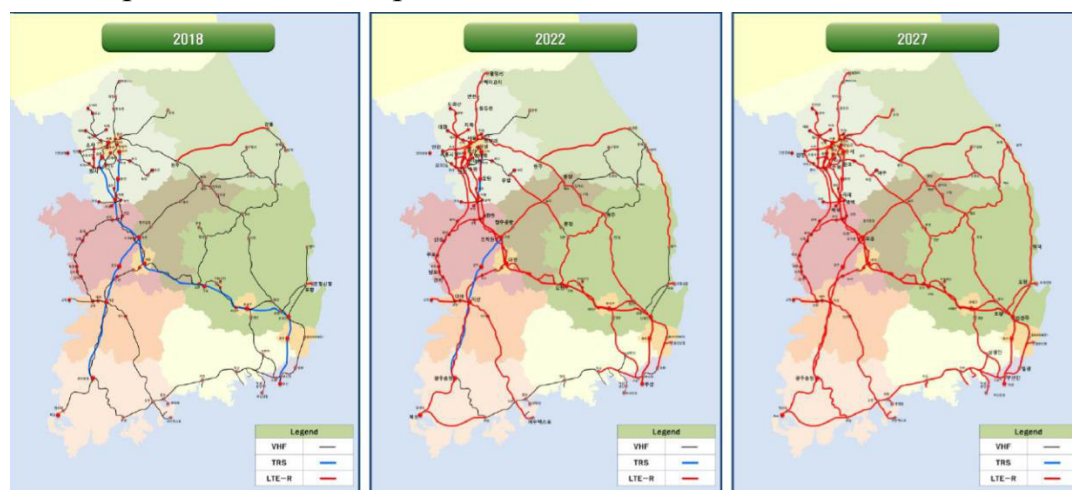


Рисунок 11 – План развития *LTE-R* в Южной Корее

Как обеспечить надежность связи на будущих железных дорогах

Учитывая разнообразие железнодорожных услуг и сценариев, архитектура соответствующей сети мобильной связи должна быть неоднородной (гетерогенной), включая различные типы сетей доступа, работающих в различных диапазонах частот и размещенных в нескольких полосах частот, несколько сценариев, а также различные требования покрытия мобильной сети. На рис. 12 представлена архитектура гетерогенной наземной сети мобильной связи для будущих железнодорожных систем. Такая сеть будет включать: (1) железнодорожные макро-ячейки, объединяющие подсети *GSM-R*, *LTE-R* и *5G-R*, (2) общественную сеть мобильной связи и (3) мобильную сеть регулирования автотранспорта. Как реализовать плавное переключение между различными режимами сети? Это является действительно сложной задачей.

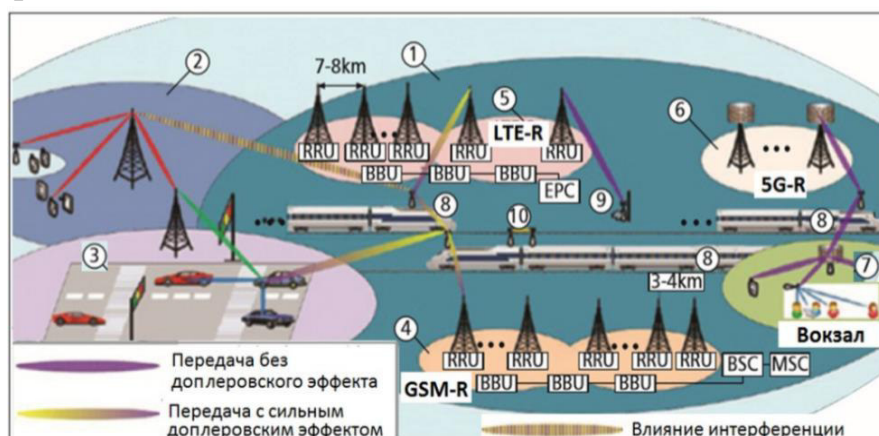


Рисунок 12 – Организация сети цифровой дороги будущего

Выделенные сети охватывают железнодорожные линии, железнодорожный вокзал, товарную станцию, сортировочные узлы и другие железнодорожные объекты для целей эксплуатации поездов. Будущие сети будут работать при очень высоких скоростях, вводя высокие доплеровские сдвиги и частые переключения. Тем самым, как планировать расстояние между двумя соседними базовыми станциями, является еще одной сложной задачей. Соседние базовые станции сети *GSM-R* (номер 4) отстоят в 3 – 4 км друг от друга, чтобы гарантировать хорошее покрытие ячейки. На данный момент стандарт *GSM-R* является почти зрелым. Тем не менее, модели канала для *GSM-R* не являются идеальными. Кроме того, сеть *GSM-R* должна работать совместно с сетью *LTE-R* (номер 5). На примере опыта Китая расстояние между двумя соседними базовыми станциями *LTE-R* может быть 7–8 км на частоте 450 МГц и 3 – 4 км для 800 МГц, что обеспечивает достаточное время для переключения канала и хорошее качество покрытия краев ячейки.

Сеть *5G-R* (номер 6) разработана для удовлетворения большой пропускной способности и услуг с высокой скоростью передачи данных. Из-за широкой полосы высоких частот и снижения способности покрытия сеть *5G-R* не подходит для оснащения железнодорожной линии, но подходит для общения в вокзале (номер 7) и внутри вагона. Одним из ключевых методов реализации *5G* является применение антенн *MIMO*. Одной из самых сложных задач для сети *5G-R* при различных железнодорожных сценариях является построение модели канала с антеннами *MIMO* в частотных диапазонах 6, 28, 38, 60 и 300 ГГц. Сценарий T2T (*train-to-train*, связь между поездами, номер 8) – это сложнейшая задача. Сценарий наземной связи (*ground-to-ground*, номер 9) относится к инфраструктуре вдоль железнодорожных путей и доступа к веб-камерам.

Успех совместной работы сетей *GSM-R*, *LTE-R* и *5G-R* (или приложений в миллиметровом диапазоне) зависит от знаний построения канала и знаний планирования и построения сетей.

#### Список литературы

1. Шнепс-Шнеппе, М. А. Цифровая железная дорога и переход от сети *GSM-R* к *LTE-R* и *5G-R* / М. А. Шнепс-Шнеппе, Н. О. Федорова, Г. В. Суконников // *International Journal of Open Information Technologies* ISSN. – 2017. – №1. – vol. 5. – С. 71 – 78.
2. *GSM* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GSM>.

3. GSM-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://en.wikipedia.org/wiki/GSM-R>.

4. Стандарт GSM-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://premier-electric.ru/стандарт-gsm-r>.

5. Принципы построения и функционирования сетей LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://1234g.ru/4g/18-printsipy-postroeniya-i-funktsionirovaniya-setej-lte>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Стельмашук Артур Сергеевич**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент гр 25, 5 курс,  
Специальность «Системы обеспечения  
движения поездов» ОмГУПС.  
Тел: +7 (913) 680-64-68  
E-mail: Arti515@yandex.ru

#### **INFORMATION ABOUT AUTHOR**

**Stelmashchuk Arthur Sergeevich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st, Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student gr 25, 5 course,  
Specialty " security Systems  
movement of trains» OSTU.  
Tel: +7 (913) 680-64-68  
E-mail: Arti515@yandex.ru

УДК 621.316

#### **К. А. Бондаренко**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

### **АНАЛИЗ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ ГЕКТОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Аннотация.* Поездная радиосвязь гектометрового диапазона давно нуждается в переходе с аналоговой передачи на цифровую. Однако, нестандартная полоса частот – 20 кГц не подходит ни под один из известных стандартов радиосвязи. В связи с этим встает вопрос о выборе оптимальной цифровой манипуляции и используемой для этой манипуляции системы помехоустойчивого кодирования. Рассматриваются варианты использования фазовой и многопозиционной модуляции в цифровых каналах связи и применения кодов Хемминга для повышения отношения сигнал/шум.

*Ключевые слова:* код Хемминга, соотношение сигнал/шум, поездная радиосвязь, помехоустойчивое кодирование, цифровая манипуляция

## **MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF PROGRAMS FOR PROCESSING RADIO-TECHNICAL SIGNALS ON THE EXAMPLE OF FFT**

***Abstract.** Hectometer train radio communications have long been in need of a switch from analogue to digital transmission. However, the non-standard frequency band of 20 kHz does not fit any of the known radio standards. In this regard, there is a question of choosing the optimal digital manipulation and the noise-resistant coding system used for this manipulation. Variants of using phase and multiposition modulation in digital communication channels and using Hamming codes to increase the signal-to-noise ratio are considered.*

***Keywords:** Hamming code, single-to-noise ratio, train radio, noise-resistant coding, digital keying.*

Особенности железнодорожного транспорта обуславливают специфичность применения цифровых стандартов радиосвязи для формирования устойчивого радиоканала между персоналом, работающим на линии и руководителями или диспетчерами. К таким особенностям относятся нестандартны полосы частот каналов поездной радиосвязи (ПРС).

Два гектометровых канала, 2,13 МГц и 2,15 МГц, используют для загоризонтного распространения сигналов специальные волноводные направляющие системы различных типов, расположенные вдоль пути.

Аппаратура и каналы гектометровой ПРС являются аналоговыми. Удовлетворительное качество радиосвязи обеспечивается при условии превышения уровня сигнала над уровнем помех не менее чем на 12 дБ. Но на участках с тягой переменного тока нормированный уровень помех достигает 60 дБ/мкВ и существенно ограничивает дальность связи с применением направляющих систем. На перегонах длиной более 20 км появляется необходимость устанавливать промежуточные радиостанции. Аналоговый канал не обеспечивает надёжный обмен данными телеметрии и телеуправления диспетчера с движущимся объектом или систем автоматики в пределах движущегося объекта. Такой обмен в режиме реального времени особенно необходим при сопровождении высокоскоростных и тяжеловесных поездов.

В связи с этим возникает задача, встающая перед ПРС: при переходе на цифровые каналы радиосвязи ГМВ становится нестандартная частота канала – 20 кГц, которую нельзя увеличить, поскольку это приведет к ухудшению качества связи в других каналах, и нельзя уменьшить, потому что тогда ухудшится помехоустойчивость.

Нормированные полосы частот для каналов ПРС на несущих 2,13 МГц и 2,15 МГц составляют по 20 кГц. При этом в такой полосе передается один аналоговый канал речи с исходной НЧ полосой 3100 Гц. Современные методы сжатия цифровой речи (MELP–2400) позволяют передавать речь хорошего качества со скоростью 2,4 кбит/сек в канале полосой 3 кГц.

Если считать суммарный цифровой поток (речь, данные, сигнализация) составит 4,0 кбит/сек при имеющейся технической пропускной способности до 16 кбит/сек в полосе 20 кГц. Имеющийся резерв может быть использован для помехоустойчивого кодирования сообщений.

Возникает задача выбора такого вида модуляции и соответствующего ей метода помехоустойчивого кодирования, которые бы дополняли друг друга и при заданной вероятности битовой или символьной ошибки  $P_s = 10^{-4}$  позволяли выделять сигнал при соотношении «сигнал/шум»  $E_s/N_0 = 0$  дБ, и даже меньше.

В данной статье рассматривается оценка методов помехоустойчивого кодирования основанных на рассмотрении методов многопозиционной и фазовой манипуляции.

Одним из самых важных качеств в цифровых системах связи является зависимость появления ошибочного бита  $P_B$  от отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$ . Безразмерное отношение  $E_b/N_0$  является стандартным качественным показателем производительности цифровых систем связи. Поэтому требуемое соотношение  $E_b/N_0$  можно рассматривать как метрику, позволяющую сравнивать качество различных систем; чем меньше требуемое отношение  $E_b/N_0$ , тем эффективнее процесс обнаружения при заданной вероятности ошибки.

Как при когерентной, так и при некогерентной могут быть использованы фазовая манипуляция (phase shift keying – PSK), частотная манипуляция (frequency shift keying – FSK), амплитудная манипуляция (amplitude shift keying – ASK), манипуляция без разрыва фазы (continuous phase modulation – CPM) и смешанные комбинации этих модуляций.

К примеру, произведем расчет MFSK-манипуляции для  $M = 8; 16; 32$  для значений  $E_b/N_0$  равных: 5; 0; -5; -10; -15; -20 дБ. Расчеты представлены в табл. 1 [2].

Вероятность символьной ошибки для модуляции MFSK

M	$E_b / N_0$ , дБ	x	$Q(x)$	$P_{Eк}(M)$	$P_{Bк}$	$P_{Eнк}(M)$	$P_{Bнк}$
4	5	1,89	0,0294	0,0882	0,0588	0,1719	0,1146
	0	1,41	0,0793	0,2379	0,1586	0,3555	0,2370
	-5	1,06	0,1446	0,4338	0,2892	0,4885	0,3257
	-10	0,80	0,2169	0,6507	0,4338	0,5920	0,3947
	-15	0,60	0,2743	0,8229	0,5486	0,6600	0,4400
	-20	0,45	0,3264	0,9792	0,6528	0,6973	0,4648
8	5	2,31	0,0104	0,0728	0,0416	0,1371	0,0914
	0	1,73	0,0418	0,2926	0,1672	0,3408	0,2272
8	-5	1,30	0,0968	0,6776	0,3872	0,5371	0,3580
	-10	0,97	0,1660	1,1620	0,6640	0,6759	0,4506
	-15	0,73	0,2327	1,6289	0,9308	0,7612	0,5075
	-20	0,55	0,2912	2,0384	1,1648	0,8107	0,5404
16	5	2,67	0,0038	0,0570	0,0304	0,0146	0,0097
	0	2,00	0,0228	0,3420	0,1824	0,3275	0,2184
	-5	1,50	0,0668	1,0020	0,5344	0,5638	0,3759
	-10	1,12	0,1314	1,9710	1,0512	0,7278	0,4852
	-15	0,84	0,2005	3,0075	1,6040	0,8229	0,5486
	-20	0,63	0,2643	3,9645	2,1144	0,8748	0,5832
32	5	2,98	0,0014	0,0434	0,0224	0,0775	0,0517
	0	2,24	0,0125	0,3875	0,2000	0,3120	0,2080
	-5	1,68	0,0465	1,4415	0,7440	0,5821	0,3881
	-10	1,26	0,1038	3,2178	1,6608	0,7652	0,5101
	-15	0,94	0,1736	5,3816	2,7776	0,8641	0,5761
	-20	0,71	0,2389	7,4059	3,8224	0,9142	0,6095

Построим графики зависимости вероятности битовой ошибки для M-арной ортогональной передачи сигналов с когерентным и некогерентным детектированием от отношения сигнал/шум по данным расчетам, рис. 1 и рис. 2 соответственно.

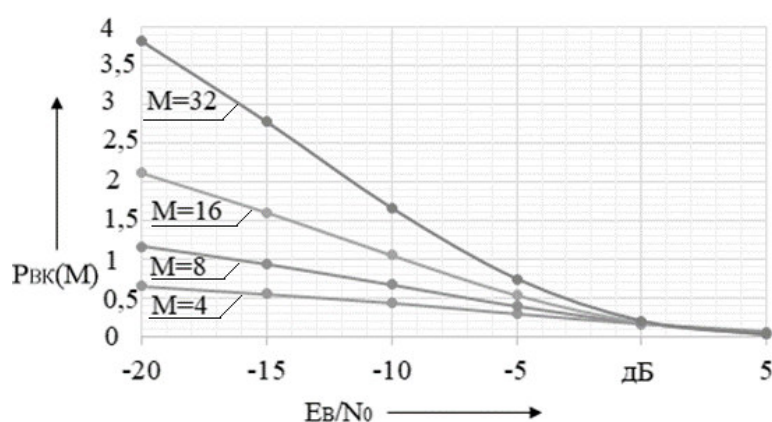


Рисунок 1 – Вероятность битовой ошибки для M-арной ортогональной передачи сигналов с когерентным детектированием

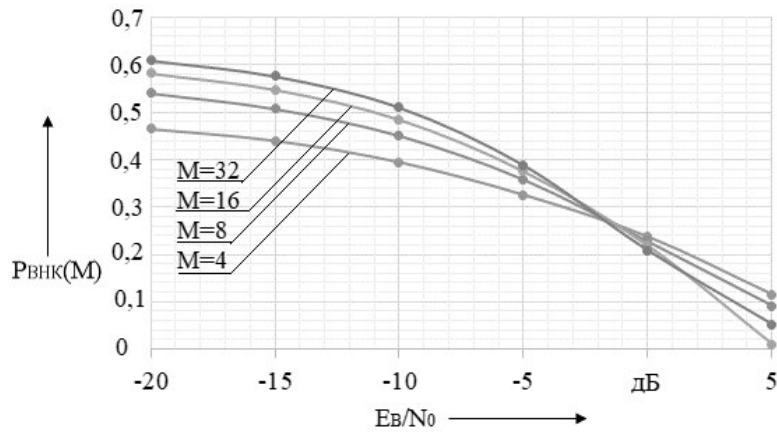


Рисунок 2 – Вероятность битовой ошибки для M-арной ортогональной передачи сигналов с некогерентным детектированием

По табл. 2 можно сделать вывод, что вероятность ошибки действительно возрастает с увеличением количества сигналов и уменьшением отношения сигнал/шум. При использовании некогерентного детектирования вероятность битовой ошибки минимальна.

Остановимся на применении некогерентного детектирования и подберем к нему один из способов кодирования.

Блочный двоичный код БЧХ (64.24.16) имеет скорость кода 0,375 и обеспечивает помехоустойчивость  $10^{-4}$  в канале с АБГШ при отношении  $E_s/N_0 = -0,5$  дБ [1]. Существуют и более эффективные методы помехоустойчивого кодирования с большим выигрышем по отношению  $E_s/N_0$  в канале.

Для сравнения рассчитаем вероятность битовой ошибки с вероятностью принятия ошибки без кодирования и с использованием кода Хэмминга (31, 26) и (7, 4), внесем в табл. 2 [3,4].

Таблица 2

Расчет частоты появления ошибок для MFSK при  $M = 4; 8; 16; 32$

M	(n,k)	Вероятность битовой ошибки в канале без кодирования	Вероятность принятия ошибки без кодирования	Вероятность битовой ошибки в канале с кодирования	Вероятность принятия ошибки с кодирования
4	(7, 4)	$28,26 \cdot 10^{-4}$	$11,53 \cdot 10^{-3}$	$42,19 \cdot 10^{-3}$	$30,13 \cdot 10^{-3}$
	(15, 11)	$28,26 \cdot 10^{-4}$	$31,4 \cdot 10^{-3}$	$15,38 \cdot 10^{-3}$	$20,31 \cdot 10^{-3}$
	(31, 26)	$28,26 \cdot 10^{-4}$	$72,6 \cdot 10^{-3}$	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$23,24 \cdot 10^{-3}$
8	(7, 4)	$29,7 \cdot 10^{-4}$	$11,87 \cdot 10^{-4}$	$18,09 \cdot 10^{-3}$	$62,75 \cdot 10^{-4}$
	(15, 11)	$29,7 \cdot 10^{-4}$	$32,6 \cdot 10^{-4}$	$36,35 \cdot 10^{-4}$	$13,23 \cdot 10^{-4}$
	(31, 26)	$29,7 \cdot 10^{-4}$	$76,89 \cdot 10^{-4}$	$13,47 \cdot 10^{-4}$	$8,11 \cdot 10^{-4}$
16	(7, 4)	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$11,18 \cdot 10^{-5}$	$67,04 \cdot 10^{-4}$	$91,3 \cdot 10^{-5}$
	(15, 11)	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$30,74 \cdot 10^{-5}$	$78,87 \cdot 10^{-5}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$
	(31, 26)	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$72,64 \cdot 10^{-5}$	$20,99 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$
32	(7, 4)	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$1,015 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-4}$	$11,9 \cdot 10^{-5}$
	(15, 11)	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$16,51 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$
	(31, 26)	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$6,59 \cdot 10^{-6}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	$4,62 \cdot 10^{-7}$

По полученным данным представлена зависимость вероятности ошибки в декодированном бите от вероятности ошибочного приема канального символа на рис. 3.

Кодирование по Хэммингу весьма несложный процесс. Достоинства кода в том, что реализация алгоритма требует небольших ресурсов и может быть выполнена аппаратно.

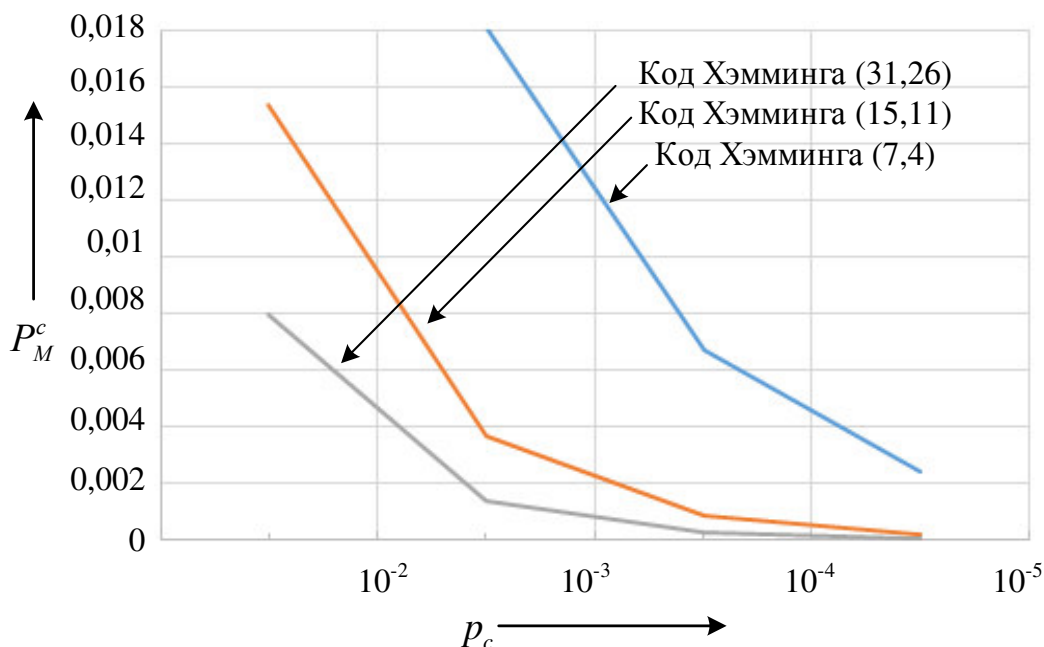


Рисунок 3 – Зависимость вероятности битовой ошибки от вероятности ошибки в канальном символе для нескольких блочных кодов

Недостатком кода Хэмминга является не кратность размера исходного блока кода и блока степени двойки. Это затрудняет обработку кодов Хэмминга на компьютерах, оперирующих блоками бит кратными степени двойки. Другим важным недостатком является невозможность создать код для исправления двойных ошибок или ошибок большей кратности.

По расчетам можно сделать вывод, что целесообразней всего использовать код Хэмминга (15, 11).

Таким образом, коды Хэмминга наряду с некогерентной фазовой манипуляцией (MFSK) с малым числом сигналов дает требуемое отношение сигнал/шум и вероятность битовой ошибки приемлемую для передачи помехоустойчивого кодового сообщения.

#### Список литературы

1. Марелос, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Марелос. – Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005.

2. Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Бернад Скляр. – М.: Вильямс, 2007. – 1104 с.

3. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: «Радио и связь», 1985. – 384 с.

4. Хэмминг, Р. В. Теория кодирования и теория информации / Р. В. Хэмминг. – М.: «Радио и связь», 1983. – 176 с.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

##### **Бондаренко Константин Александрович**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент

кафедры «Автоматика и системы  
управления» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: gbondarenkok@gmail.com

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

##### **Bondarenko Konstantin Aleksandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer  
of the department «Telecommunication, radio  
engineering systems and networks» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

E-mail: gbondarenkok@gmail.com

УДК 621.3.049

#### **Ю. Ю. Ушнурцева**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

### **МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

*Аннотация.* В статье описано моделирование процесса влияния импульсов на оборудование радиосвязи.

*Ключевые слова:* моделирование; электромагнитный импульс; радиосвязь.

#### **Julia Yu. Ushnurtseva**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

*Abstract.* The article describes the modeling of the process of influence of pulses on radio equipment.

*Keywords:* modeling; electromagnetic pulse; radiocommunication.

Существенным дестабилизирующим фактором, от воздействия которого могут произойти сбои в телекоммуникационных сетях, является атмосферное

электричество. Поэтому существенное значение имеет оценка качества функционирования аппаратуры, подверженной влиянию импульсного магнитного поля (ИМП), создаваемого разрядом молнии. Согласно ГОСТу Р 50649-94 [4], форма испытательного ИМП должна соответствовать форме импульса тока, установленной для испытания технических средств (ТС) на помехоустойчивость: с длительностью 16 мкс и длительностью фронта 6,4 мкс.

Для характеристики грозовых токов используются следующие параметры:

Максимальная величина импульса тока молнии.

Степень крутизны фронта грозового тока.

Продолжительность фронта импульса тока.

Длительность полного импульса.

Продолжительность импульса тока молнии – это время, необходимое для прохождения обратным разрядом дистанции между землей грозовым облаком (20...100 мкс). Фронт импульса тока молнии при этом находится в диапазоне от 1,5 до 10 мкс.

Средняя продолжительности импульса тока грозового разряда имеет величину, равную 50 мкс. Данное значение является стандартной величиной импульса тока молнии при проведении испытаний электрической прочности экранированных кабелей: они должны выдерживать прямые удары молнии и сохранять целостность изоляции. Для проведения испытаний прочности изоляции при воздействии грозовыми импульсами напряжения (испытания регламентированы ГОСТ 1516.2-97 [3]) принят стандартный импульс грозовых токов напряжения, продемонстрированный на рис. 1 (для удобства проведения расчетов фактический фронт приведён к эквивалентному косоугольному).

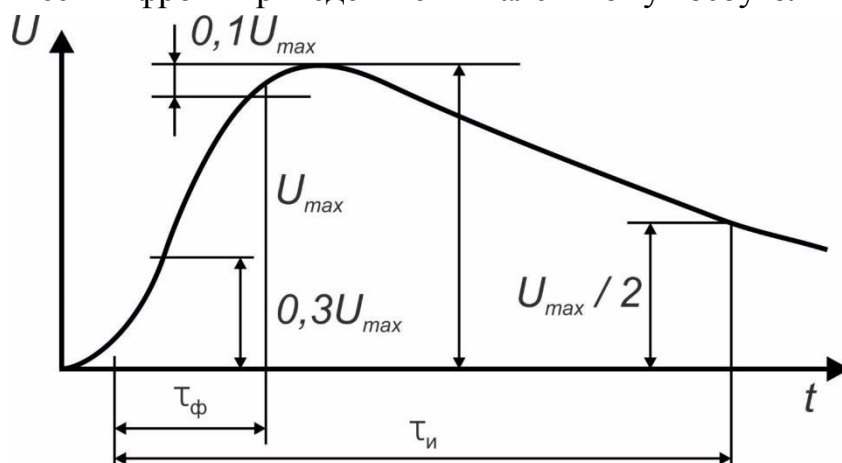


Рисунок 1 – Развертка стандартного грозового импульсного напряжения

На вертикальной оси развёртки импульсного перенапряжения на уровне

равном 0,3  $U_{max}$  и 0,9  $U_{max}$  размечаются контрольные точки, соединяемые прямой линией. Пересечение данной прямой с временной осью и с горизонтальной прямой, касающейся  $U_{max}$ , позволяет определить продолжительность импульса  $T_f$ . Стандартный грозовой импульс имеет значение 1,2/50: где  $T_f = 1,2$  мкс,  $T_i = 50$  мкс (полная длительность импульса).

Ещё одна важная характеристика грозового импульса – это скорость нарастания тока напряжения на фронте импульса (крутизна фронта,  $A^*мкс$ ). В горах отмечается уменьшение амплитуды колебаний токов молнии (почти в два раза) в сравнении со значениями для равнин. Это объясняется тем, что горы ближе до облаков, поэтому в горной местности молнии возникают при гораздо меньшей плотности заряженных частиц в грозовых облаках, что приводит к уменьшению амплитудных значений токов молнии [6].

Во время прохождения токов молнии через различные объекты последние подвергаются механическим, электромагнитным и тепловым воздействиям.

Значительное тепловыделение способно разрушить металлические проводники небольших сечений (например, плавкие вставки предохранителей или телеграфные провода). Для определения критического значения тока молнии  $I_m$  (кА), при котором происходит плавление или даже испарение проводника, используются следующая формула (1):

$$I_m = k \frac{Q}{\sqrt{t_m}} \quad (1)$$

где  $k$  – удельный коэффициент, зависящий от материала проводника (медь 300...330, алюминий 200 ...230, сталь 115...440).

$Q$  – поперечное сечение проводника,  $мм^2$ ;

$t_m$  – продолжительность импульса тока молнии, мкс.

Проходя сквозь узкие щели и небольшие отверстия, грозовые разряды, производят значительные разрушения. Например, токи молнии легко деформируют трубчатые разрядники, установленные на ЛЭП. Даже классические диэлектрики (камень и кирпич) подвергаются разрушительному воздействию мощных разрядов. Электростатические силы ударного характера, которые имеются у оставшихся зарядов, легко разрушают толстостенные кирпичные и каменные постройки.

Во время стадии главного разряда молнии рядом с местом её удара в проводниках и металлических конструкциях энергетических объектов возникают импульсные наводки и перенапряжения, которые проходя через заземление энергообъектов, создают высокочастотные импульсные помехи и значительное падение напряжения, достигающее 1 000 и более кВ. Грозовые

разряды могут происходить не только между грозowymi облаками и землей, но и между отдельными облаками. Подобные молнии совершенно безопасны для персонала и оборудования энергообъектов. В то же время грозвые разряды, доходящие до земли, представляют серьёзную опасность для людей и технических устройств [1].

Опасность повреждения чувствительной аппаратуры и ее цепей будет зависеть от многих факторов, один из которых – параметры молниевго импульса. Очевидно, что чем выше ток молнии, тем больше опасность. Аналогично можно сказать и о крутизне фронта молниевго импульса – чем она выше, тем больше могут быть разности потенциалов, возникающие между различными точками объекта (при равных амплитудах тока), и тем, соответственно, выше опасность. [2]

Требования и методы испытаний приборов на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии устанавливает ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) [5]. Согласно этому ГОСТу длительность фронта импульса должна быть равной 1 мкс, длительность импульса (на уровне 50% пикового значения) – 50 мкс, интервал между импульсами – 1 мин, выходное сопротивление испытательного генератора – 10 Ом (схема «провод-заземление») или 2 Ом (схема «провод-провод»).

На рис. 2 изображён график зависимости напряжения от времени в мкс.

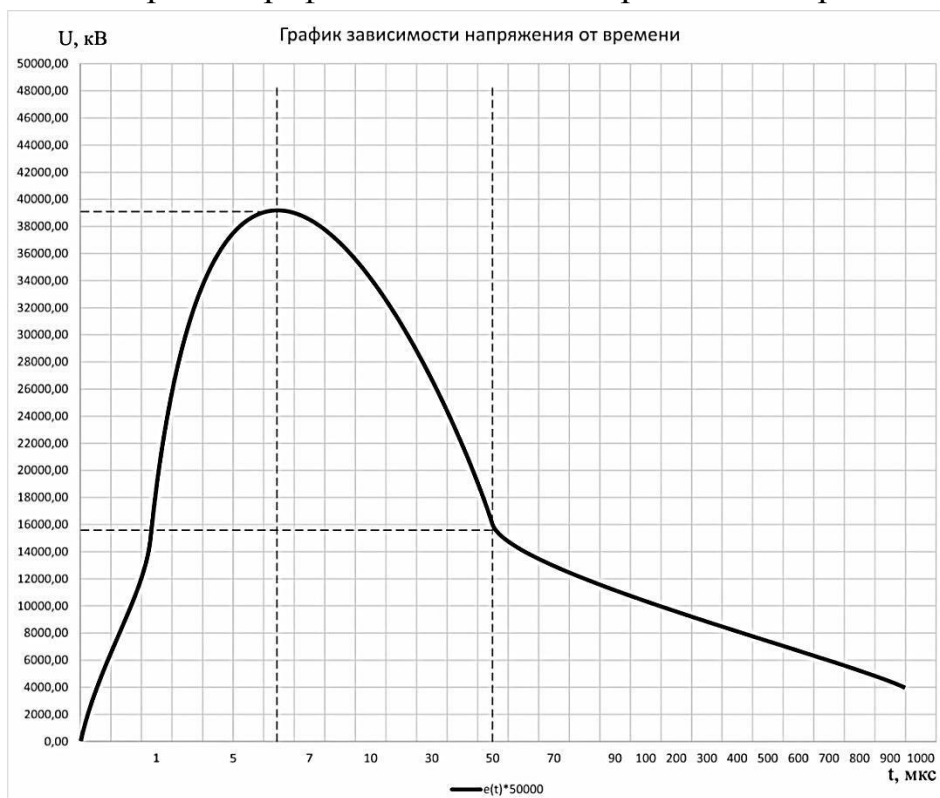


Рисунок 2 – График зависимости напряжения от времени

Ток описывается следующими выражениями:

$$\text{при } r > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – аperiодический режим: } i(t) = -\frac{E}{\beta \cdot L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sinh(\beta \cdot t); \quad (2)$$

$$\text{при } r < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – колебательный режим: } i(t) = -\frac{E}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t; \quad (3)$$

$$\text{при } r = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – критический режим: } i(t) = -\frac{E}{L} - t e^{-\alpha t} \quad (4)$$

Чтобы получить ток такой формы расчётным путём были найдены значения параметров R, C, L [7]:

Для аperiодического режима: R=50 Ом; C=1,33 нФ; L=1,6 мкГн; E=100 В (рисунок 3).

$$i(t) = -\frac{E}{\beta \cdot L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sinh(\beta \cdot t); \quad \alpha = \frac{R}{2L}; \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L \cdot C}}. \quad (5)$$

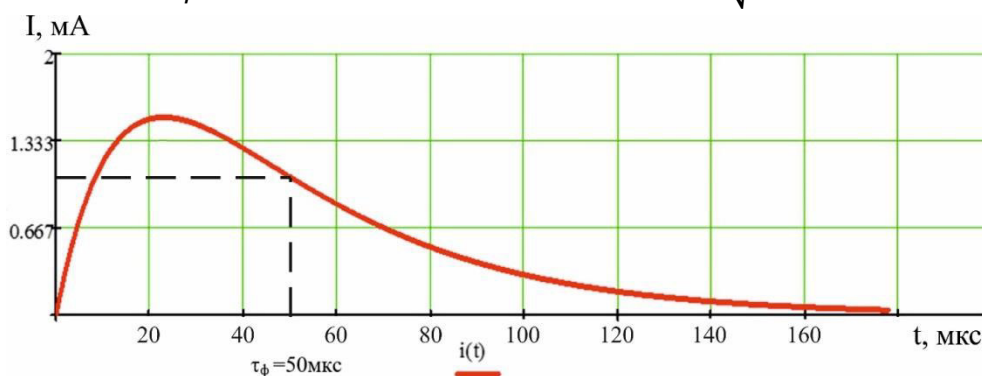


Рисунок 3 – График аperiодического режим

Таким образом, полученные расчётным путём значения параметров R, C, L позволят смоделировать процесс влияния импульсов на оборудования радиосвязи, а также базируясь на разработанной методике, можно выработать эксплуатационно-технические требования к устройствам защиты.

#### Список литературы

1. Балюк, Н. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н. В. Балюк, Л. Н. Кечиев, П. В. Степанов. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007 – 478 с.
2. Рикетс, Л. У. Электромагнитный импульс и методы защиты / Л. У. Рикетс Дж. Э. Бриджес, Дж. Майлетта. – Атомиздат, 1979. – 328 с.
3. ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – М.:ИПК Издательство стандартов, 2004. – 35 с.

4. ГОСТ Р 50649-94 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 29 с.

5. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2008. – 35 с.

6. Матвеев, М. Параметры импульса молнии. Расчёт для защиты микропроцессорной аппаратуры и её цепей / М. Матвеев, М. Кузнецов, И. Дутов // Новости электротехники. – 2011. – №4 (70). – С. 2 – 6.

7. Митрохин, В. Е. Математическое моделирование разряда статического электричества, возникающего на поверхности космического аппарата / В. Е. Митрохин, А. В. Жабина, М. В. Митрохин // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники: Материалы IV Всероссийской научной конференции, посвящённой 80-летию со дня рождения Главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова. – Омск. ОмГТУ, 2009. – С.47 – 50.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Ушнурцева Юлия Юрьевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.  
Тел.: 8 (908) 317-95-63.  
E-mail: ushnurceva.uu@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Ushnurtseva Julia Yurievna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av.m Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Graduate student of the department  
«Telecommunication, radio engineering systems  
and networks» OSTU.  
Phone: 8 (908) 317-95-63.  
E-mail: ushnurceva.uu@mail.ru

УДК 621.3

**Д. В. Демиденко**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

### **МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОМОДЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТОКОВ В ЗАЗЕМЛЯЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

*Аннотация.* В данной статье рассмотрена возможность создания канала радиосвязи на основе микросхемы СС430F5137, рассмотрены её основные характеристики. Описаны основные алгоритмы, используемые в устройстве для ускорения проведения математических операций.

*В статье приведена принципиальная схема устройства, алгоритм работы, а так же рассмотрены варианты увеличения радиуса действия трансивера.*

*Ключевые слова:* радиомодем, радиосвязь, CC430, микроконтроллеры, телеметрия.

**Denis V. Demidenko**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **RADIOMODEM IN THE DEVICE FOR MONITORING THE STATE OF TELECOMMUNICATION CHAINS**

***Abstract.** This article discusses the possibility of creating a radio channel based on the SS430F5137 chip, its main characteristics are considered. The basic algorithms used in the device to accelerate mathematical operations are described. The article provides a schematic diagram of the device, an algorithm of operation, as well as options for increasing the radius of the transceiver.*

***Keywords:** radio modem, radio communication, CC430, microcontrollers, telemetry.*

В настоящее время имеется такая актуальная проблема, как сбор данных с сети датчиков. Поскольку речь идет о мониторинге значительной территории, площадь которой может достигать нескольких квадратных километров, для автоматизации сбора данных выгоднее использовать датчики, оснащенные устройствами радиосвязи. Исходя из этого была поставлена цель: разработать модем для обеспечения основного канала передачи информации в устройстве контроля состояния цепей заземления.

В качестве радиомодуля используется микроконтроллер CC430F5137, который предназначен специально для портативных устройств, требующих длительного времени автономной работы. Данный микроконтроллер представляет собой систему на кристалле, где объединены трансивер CC1101 и микроконтроллер MSP430.

Данный микроконтроллер имеет такие модули, как аппаратный умножитель и модуль расчета CRC16, которые используются для ускорения математических операций во время кодирования, при этом помогают значительно разгрузить центральный процессор.

Микросхема обладает следующими характеристиками:

- Напряжение питания составляет 1,8...3,6В;
- Потребляемый ток без учета трансивера в активном режиме составляет 180мкА/МГц; 1,7 мкА – в дежурном режиме и 1 мкА – в спящем;

- Температурный диапазон –45...+80 °С.

Особенности радиомодуля на основе CC1101:

- Полосы частот: от 300 МГц до 348 МГц, от 389 МГц до 464 и от 779 до 928 МГц;

- Программно настраиваемая скорость передачи данных от 0,8 кБод до 500 кБод;
- Программно настраиваемая выходная мощность до 10 дБм для всех поддерживаемых частот;
- Поддерживается 2-FSK, 2-GFSK и MSK, а так же OOK, ASK;
- Гибкая поддержка пакетно-ориентированных систем: встроенная поддержка для определения синхрослова, проверки адреса, переменной длины пакета и автоматической обработки CRC.
- Возможность отображения показателя уровня входного сигнала (RSSI) [1].

Упрощенная структурная схема радиомодуля, содержащегося в микроконтроллере показана на рис. 1.

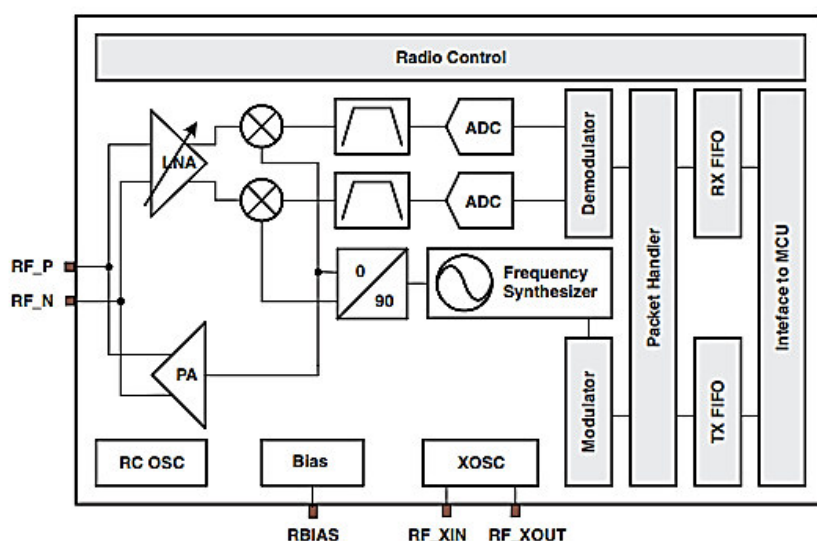


Рисунок 1 – Структурная схема радиомодуля

Принципиальная схема устройства изображена на рис. 2. В разработанном радиомодеме установлены следующие параметры:

- Частота несущей: 914.999969 МГц;
- Скорость передачи: 38.383484 кБод;
- Полоса пропускания фильтра: 101.562500 кГц;
- Разнос каналов: 199.951172 кГц;
- Частота кварцевого резонатора: 26 МГц;
- Модуляция: GFSK;
- Точность кварцевого резонатора: 10 ppm;
- Мощность сигнала: 10 dBm;
- Девиация: 19 kHz;
- Номер канала: 0;

- Режим: асинхронный;
- Проверка CRC: отключена;
- Длина пакета: 255 байт;

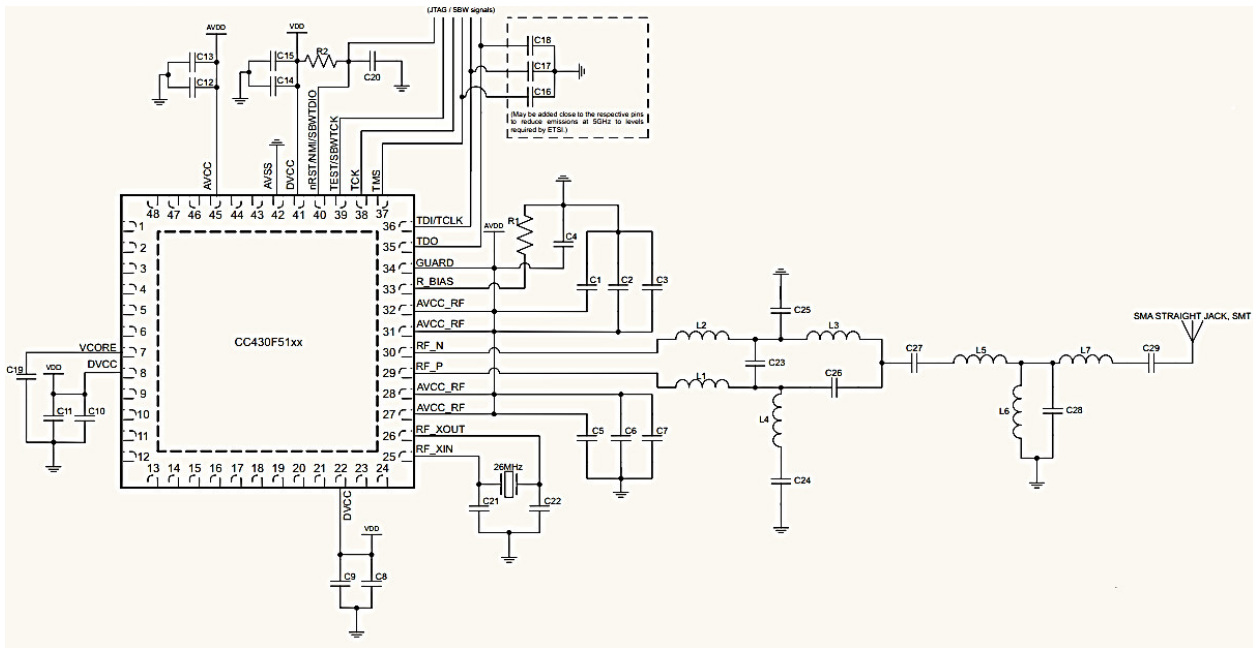


Рисунок 2 – Принципиальная схема радиомодема

Алгоритм работы программы для модема приведен на рис. 3. Если в буфере приема CC1101 появляются данные, то происходит прерывание и эти данные отправляются в микроконтроллер.

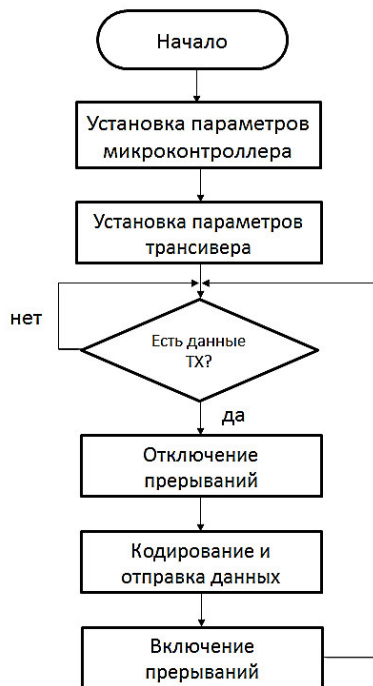


Рисунок 3 – Алгоритм программы радиомодема

## Увеличение выходной мощности

В некоторых устройствах может потребоваться расширить диапазон связи. Наиболее эффективным способом сделать это является добавление внешнего усилителя мощности, либо внешней антенны с высоким коэффициентом направленного действия.

Усилитель мощности должен быть вставлен между антенной и согласующим трансформатором, и для отключения усилителя в режиме RX необходимы два переключателя Т / R (см. Рисунок 4). В качестве такого усилителя может быть использован усилитель мощности CC1190. С помощью данной микросхемы сигнал может быть усилен до 27 дБм [2].

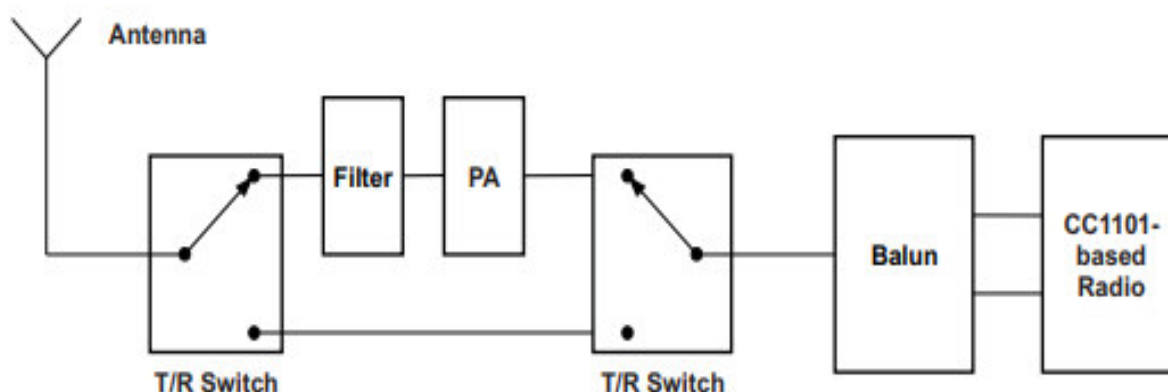


Рисунок 4 – Схема подключения усилителя мощности

## Список литературы

1. CC430 Family User's Guide (Rev. E) [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ti.com/lit/ug/slau259e/slau259e.pdf> (Дата обращения 20.10.2019).
2. 850 – 950 MHz RF Front End [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1190.pdf> (Дата обращения 20.10.2019).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Демиденко Денис Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «ТРСиС» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: den\_demid@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Demidenko Denis Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Postgraduate of the department «TRSandN»

OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: den\_demid@mail.ru

**Д. Е. Быченков**

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),  
г. Новосибирск, Российская Федерация

## **ОБ ОБНАРУЖЕНИИ ОШИБОК В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С КООПЕРАТИВНОЙ РЕТРАНСЛЯЦИЕЙ**

*Аннотация.* Рассматривается влияние ошибок демодуляции в ретрансляторе в беспроводных сетях с кооперативной ретрансляцией, использующих схему *Selective Relaying*.

*Ключевые слова:* кооперативная ретрансляция, вероятность битовой ошибки, беспроводная сенсорная сеть.

**Daniil E. Bychenkov**

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

## **ON THE DETECTING ERRORS IN WIRELESS NETWORKS WITH COOPERATIVE RELAYING**

*Abstract.* Examines the impact of the demodulation error in the relay node in wireless networks with *Selective Relaying*.

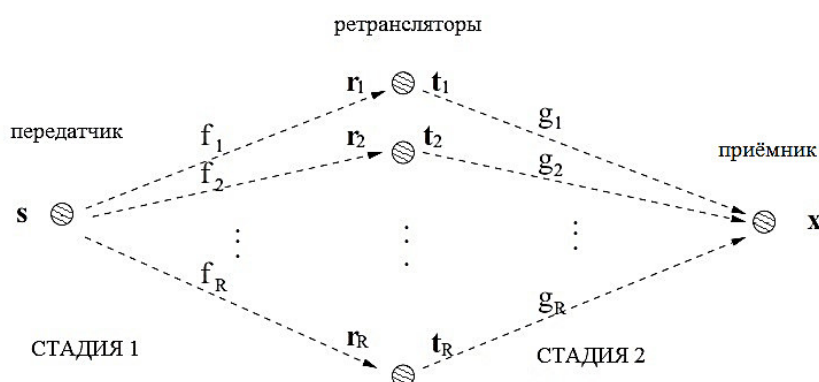
*Keywords:* cooperative relaying, bit error rate (BER), wireless sensor network.

Использование разнесения для борьбы с замираниями в каналах к настоящему времени широко распространено в системах беспроводной связи. В частности, применение технологии с множеством входов и множеством выходов (ММО) выгодно с точки зрения повышения пропускной способности и уменьшения вероятности битовых ошибок [6]. Однако использование ММО в мобильных сетях часто сталкивается с проблемой практической реализации размещения нескольких антенн в небольшой мобильный терминал. Технология ММО опирается на независимость путей между передающей и приемной антеннами, для которых необходимо разделение антенного элемента в несколько раз по длине волны - требование, которое трудно удовлетворить с терминалами небольшого размера. В попытке преодолеть это ограничение, схемы кооперативной ретрансляции были введены в работах [1] - [4]. Основная идея заключается в том, что вокруг терминала могут быть другие одноантенные терминалы, которые можно использовать для увеличения разнесения путем формирования виртуальной (или распределенной) многоантенной системы.

В данной работе исследуется вероятность битовой ошибки в приёмнике

для схемы ретрансляции с использованием жёстких решений (Decode-and-Forward) в ретрансляторе и отключением ретрансляторов, в которых произошло ошибочное детектирование (Selective Relaying).

Рассмотрим беспроводную сеть с количеством узлов  $R+2$ , которые размещены произвольным образом. Один из узлов является передатчиком (источником) и один приёмником. Остальные  $R$  узлов являются ретрансляторами. Каждый узел имеет одну антенну, которая используется как для приёма, так и для передачи. Так как все узлы (датчики) для вычислений должны обладать одним и тем же блоком данных, то будем считать, что все узлы приняли данные, когда самый удалённый от передатчика узел (не имеющий возможность принимать от него напрямую сигнал) успешно их принял. Обозначим канал передачи от передатчика до  $i$ -ого ( $i=1,2,\dots,R$ ) ретранслятора как  $f_i$ , а канал от  $i$ -ого ретранслятора до приемника как  $g_i$ . Схема с изображением работы сети показана на рис.1, из которого следует, что передача данных происходит в две стадии. На первой передатчик одновременно транслирует сигнал (вектор)  $s$  для  $R$  ретрансляторов в течение некоторого фиксированного интервала времени. На второй стадии ретрансляторы проверяют принятые данные на наличие ошибок и в случае, если ошибки не были обнаружены, в течение некоторого другого фиксированного интервала времени передают сигнал приёмнику. Для того, чтобы иметь возможность одновременного приёма сигналов от всех ретрансляторов в одной полосе частот, на второй стадии используется ортогональный пространственно-временной код [5]. В рассматриваемой системе отсутствует канал передачи между приёмником и передатчиком. Математическое описание данной беспроводной сети можно найти в работе [6].



Риунок 1 – Распределённая беспроводная сеть с ретрансляторами

Для простоты описания, рассмотрим беспроводную систему с четырьмя ретрансляторами, а в качестве созвездия модуляции используем BPSK. Сначала

рассмотрим случай, когда ретранслятор безошибочно обнаруживает каждый неправильно демодулированный (декодированный) бит. То есть передача данных в такой системе происходит по одному биту, причем ретрансляторы способны обнаружить ошибку. Это идеальный случай. Формула для битовой ошибки в приёмнике будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_r &= \sum_{k=0}^4 P_{SR}^{4-k} C_4^{4-k} [1 - P_{SR}]^k P_{RD}(m=k) = \\
 &= P_{SR}^4 + P_{SR} C_4^1 [1 - P_{SR}]^3 P_{RD}(m=3) + P_{SR}^2 C_4^2 [1 - P_{SR}]^2 P_{RD}(m=2) + P_{SR}^3 C_4^3 [1 - P_{SR}] P_{RD}(m=1) + \\
 &\quad + [1 - P_{SR}]^4 P_{RD}(m=4) \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $P_{SR}$  – вероятность отключения  $i$ -ого ретранслятора ( $i=1,2,3,4$ );

$P_{RD}$  – вероятность ошибки в приёмнике на второй стадии;  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  –

число сочетаний. Согласно [5], формулы для вероятностей битовой ошибки на второй и первой стадиях соответственно, будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_{RD} &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{0.25 \cdot q_{RD}^2}{1 + 0.25 \cdot q_{RD}^2}} \left( \sum_{i=0}^{m-1} \frac{C_{2i}^i}{[4(1 + 0.25 \cdot q_{RD}^2)]^i} \right) \right], \\
 P_{SR} &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{q_{SR}^2}{1 + q_{SR}^2}} \right],
 \end{aligned}$$

где  $q_{RD}^2 = \frac{P}{\sigma_{RD}^2}$  – отношение сигнал/шум по мощности в канале ретрансляторы-

приёмник;  $q_{SR}^2 = \frac{P}{\sigma_{SR}^2}$  - отношение сигнал/шум по мощности в канале передатчик-ретранслятор.

Также рассмотрим случай, когда передача данных ведется пакетами длиной 120 бит и отключение ретрансляторов на второй стадии происходит в случае обнаружения ошибки в пакете. Тогда в формуле (1) вероятность отключения ретранслятора  $P_{SR\_frame}$  будет выглядеть следующим образом:

$$P_{SR\_frame} = 1 - (1 - P_{SR})^{120},$$

а сама формула примет вид

$$\begin{aligned}
 P_r &= P_{SR\_frame}^4 \cdot 0.5 + P_{SR\_frame} C_4^1 [1 - P_{SR\_frame}]^3 P_{RD}(m=3) + P_{SR\_frame}^2 C_4^2 [1 - P_{SR\_frame}]^2 P_{RD}(m=2) + \\
 &\quad + P_{SR\_frame}^3 C_4^3 [1 - P_{SR\_frame}] P_{RD}(m=1) + [1 - P_{SR\_frame}]^4 P_{RD}(m=4)
 \end{aligned}$$

На рис. 2 изображены кривые вероятности битовой ошибки для системы с

пакетной передачей данных и для идеальной системы. Видно, что идеальная система на 10 дБ превосходит систему с пакетной передачей данных (длина пакета 120 бит). При этом если уменьшать длину пакета, то вероятность ошибки будет стремиться к значению идеальной системы.

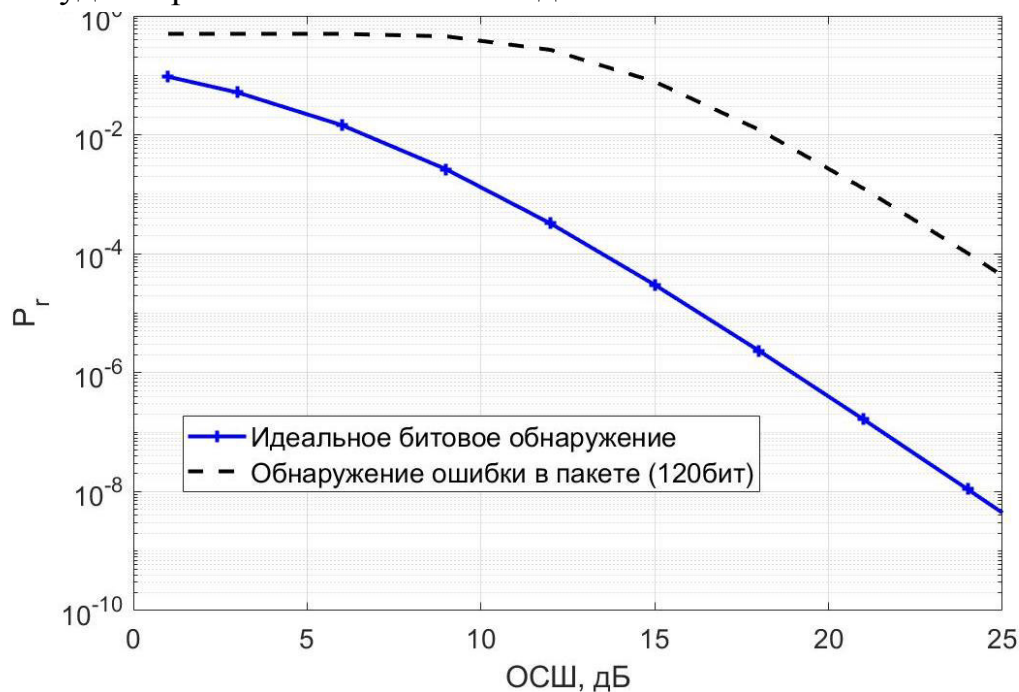


Рисунок 2 – Вероятность битовой ошибки в беспроводной сети с четырьмя ретрансляторами (Selective Relaying)

Таким образом, были получены теоретические зависимости вероятности битовой ошибки для беспроводной сети с кооперативной ретрансляцией, работающей по схеме Selective Relaying.

#### Список литературы

1. Performance evaluation of multiuser diversity in multiuser two-hop cooperative multi-relay wireless networks using maximal ratio combining over Rayleigh fading channels / M. F. Al-Mistarihi [et al.] // International Journal of Communication Systems. – 2013.
2. Hu, J. Symbol Error Probability and Channel Capacity for Multiuser Diversity of Amplify-and-Forward Cooperative Networks / J. Hu, X. Chen // In Proc. of 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2011). – Wuhan, China, 2011. – pp. 1 – 4.
3. Rui, X. Decode-and-forward with full-duplex relaying / X. Rui, L. Hou, L. Zhou // International Journal of Communication Systems. – 2012. – vol. 25. – issue 2. –pp. 270 – 275.

4. Barua, B. On the symbol error probability of multihop parallel relay networks / B. Barua, M. Abolhasan, F. Safaei // IEEE communications letters. – 2011. – vol.15. – issue 7. – pp. 719 – 721.

5. Jafarkhani, Hamid Space-Time Coding: Theory and Practice / Hamid Jafarkhani. – Cambridge University Press, 2005. – 302 p.

6. Быченков, Д. Е. Использование технологии ММО для решения вычислительных задач в системе сейсмических датчиков / Д. Е. Быченков, Райфельд М. А. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018). – 2018 – Т.4. – С. 35 – 37.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Быченков Даниил Евгеньевич**  
Новосибирский государственный  
технический университет (НГТУ).  
Маркса пр., д. 20, г. Новосибирск, 630073,  
Российская Федерация.  
Аспирант кафедры «Теоретические основы  
радиотехники» НГТУ.  
Тел.: +7 (383) 346-15-37.  
E-mail: omg250@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Bychenkov Daniil Evgenyevich**  
Novosibirsk State Technical University (NSTU).  
20, Marx st., Novosibirsk, 630073,  
the Russian Federation.  
Post graduate student at the department «Theoretical  
foundations of radio engineering» NSTU.  
Phone: +7 (383) 346-15-37.  
E-mail: omg250@mail.ru

УДК 621.39

**Е. В. Демух, Р. А. Платковский**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

***Аннотация.** На сегодняшний день цифровая радиосвязь является одной из наиболее динамично развивающихся областей телекоммуникаций, так как позволяет реализовать полный спектр информационных услуг: передачу телефонных сообщений, обмен данными, подключение к глобальным информационным сетям, получение и передачу видеоизображений, телевидения и т.д. Не менее востребован данный вид связи и на железнодорожном транспорте, которому присущи мобильность и большие скорости передвижения, а также необходимы безопасные и быстро коммутируемые каналы связи. В связи с этим перед связистами всего мира стоит вопрос о выборе наиболее удачного и подходящего вида связи.*

***Ключевые слова:** Телекоммуникационная сеть, беспроводная связь, GSM-R, LTE-R, ETCS.*

## **PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF DIGITAL WIRELESS COMMUNICATIONS NETWORKS ON RAILWAY TRANSPORT**

***Abstract.** Today digital radio communication is one of the most dynamically developing areas of telecommunications. It allows to implement a full range of information services: sending telephone messages, exchanging data, connecting to global information networks, receiving and transmitting videos, television, etc. This type of communication is also in demand in rail transport, which is characterized by mobility and high speeds of movement, as well as safe and quickly switched communication channels. In this regard, the signalmen of the whole world are faced with the question of choosing the most successful and suitable type of communication.*

***Keywords:** Telecommunication network, wireless connection, GSM-R, LTE-R, ETCS.*

В настоящее время ведутся работы по созданию основы для новой стандартизированной железнодорожной телекоммуникационной сети, которая заменит *GSM-R*, начиная с 2021 или 2022 года. Но сохраняется большая неопределенность в отношении технологии, которую будет использовать эта новая сеть, и того, готов ли железнодорожный сектор к замене существующих сетей *2G*.

Сети *GSM-R* в Европе создаются по требованиям *EIRENE* (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network* – европейская интегрированная железнодорожная сеть радиосвязи), что обеспечивает в частности набор сервисов, эксплуатационную совместимость и координацию частот.

На сегодняшний день на территории Европы широко эксплуатируется Европейская система управления железнодорожным движением (*European Railway Traffic Management System, ERTMS*), состоящая из двух частей [1]:

- 1) Европейская система управления движением поезда (*European Train Control System, ETCS*), стандарт для управления движением поездов в кабине;
- 2) *GSM-R*, стандарт мобильной связи *GSM* для железнодорожных перевозок. *GSM-R* обеспечивает защищенную голосовую связь и передачу данных между железнодорожными службами, поездами и центром управления.

В системе *ETCS* (рис. 1) для управления поезда можно выделить три составные части:

- 1) компьютер в кабине машиниста - *Eurocab*, связанный с терминалом *GSM-R*, который установлен на поезде;
- 2) *Eurobalises* (путевые приемопередатчики), по которым определяются

местоположение и скорость поезда, а также характеристики пути в данном месте: кривизна пути, ограничения по скорости и т.д.;

3) *Euroradio*, система непрерывной радиосвязи между поездом и центром управления по сети *GSM-R*.



Рисунок 1 – Схема действия *ETCS*

В основу работы *ETCS* заложена идея непрерывного контроля перевозочного процесса с помощью сочетания различных технических средств, благодаря чему достигается безопасное уменьшение интервала следующих друг за другом поездов, а значит увеличение пропускной способности. Действие *ETCS* базируется на определении местоположения поезда, вычислении расстояния между составами, контроле максимально допустимой скорости на участке, расчёте кривой торможения (зависимости скорости от пройденного пути), сопоставлении данных о маршруте с техническими характеристиками поезда. Приём, обработка и передача всей необходимой информации осуществляется комплексом напольных и бортовых устройств и систем *ETCS* по каналам *GSM-R* [2].

Преимущества:

а) повышение пропускной способности на существующих железнодорожных линиях;

б) больше возможности реагировать на рост пассажиропотока и объемов грузоперевозок;

в) *ERTMS* сокращает интервалы попутного следования поездов, увеличивая пропускную способность существующей железнодорожной инфраструктуры до 40%;

г) увеличение скорости движения: *ERTMS* позволяет поддерживать скорости движения до 500 км/ч, что делает *ERTMS* приоритетным выбором при проектировании высокоскоростных магистралей во многих странах;

д) *ERTMS* увеличивает надежность работы систем и пунктуальность перевозок, что крайне важно, как для пассажирского, так и грузового движения;

- е) эксплуатационные расходы снижаются за счет уменьшения количества напольного оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики;
- ж) стационарное и бортовое оборудование может поставляться любым производителем, благодаря открытому стандарту, что дает свободный доступ для поставщиков;
- з) рост конкуренции на рынке поставщиков;
- и) повышение безопасности пассажиров, работников железных дорог и грузового транспорта.

*GSM-R* является закрытой сетью. В этой сети каждый абонент имеет не только особый «функциональный» номер, зависящий от функции, осуществляемой данным абонентом в процессе железнодорожных перевозок (диспетчер, машинист, начальник поезда, обходчик, сцепщик и т. п.), но и связанные с выполняемой функцией права осуществления вызова и приоритет обслуживания. Например, диспетчер имеет более высокий приоритет, чем остальные абоненты. Наивысший же приоритет имеет аварийный вызов. При появлении такого вызова от одного из абонентов на данном участке пути система обеспечивает разрыв соединения, имеющего более низкий приоритет, и оповещение об аварийной ситуации. Кроме того, сети, организованные по стандарту *GSM-R*, обладают рядом дополнительных свойств, которые позволяют удовлетворить особые потребности железных дорог за счет применения групповых и циркулярных вызовов, а также механизма приоритетов. Диспетчер может, например, вызвать все поезда, находящиеся в пределах зоны группового вызова, составленной из зон действия нескольких базовых радиостанций.

В России системы с использованием сетей *GSM-R* лишь развиваются. Компания ТрансТелеКом реализовала три проекта с использованием данной технологии:

1. на участке железной дороги Туапсе-Сочи-Адлер-Красная Поляна общей длиной 155 км развернута сеть *GSM-R* на базе оборудования *Huawei Technologies*;
2. технология *GSM-R* внедрена на участке высокоскоростной железной дороги для движения поездов «Аллегро» на трассе от Санкт-Петербург-Бусловская до государственной границы с Финляндией;
3. в 2016 г. на Московском центральном кольце была спроектирована и реализована цифровая система для связи машинистов электропоездов с диспетчерами на базе технологии *GSM-R*. В рамках этого проекта ТрансТелеКом запустил 22 базовые станции по технологии *GSM-R*.

Новая цифровая сеть радиосвязи обладает рядом преимуществ, позволяющих сделать обмен информацией более простым, повысить качество обслуживания абонентов и уровень безопасности сети. Интеллектуальная сеть, действующая в пределах системы *GSM-R*, автоматически находит зарегистрированных абонентов, выполняющих в данный момент времени требуемую функцию, что способствует повышению безопасности на железнодорожном транспорте.

*GSM-R* дает возможность отказаться от нескольких параллельных сетей радиосвязи. В настоящее время на железных дорогах используются несколько сетей аналоговой радиосвязи (оперативно-технологическая, поездная, маневровая и т. п.), которые несовместимы друг с другом. *GSM-R* объединяет разные службы и делает неэффективной сложную структуру, присущую аналоговым сетям.

Потенциал *GSM-R* не ограничивается лишь телефонной связью. Изучается возможность беспроводной передачи команд на напольные устройства - стрелки, устройства ограждения поездов и т. п. Информация о координатах и скорости поезда, а также о состоянии тормозов и прочих важных систем будет передаваться по напольным устройствам в центр управления, что позволит полностью автоматизировать процесс движения поездов, а также существенно сократить время на техническое обслуживание и маневровую работу.

В настоящее время разрабатываются требования к новому поколению железнодорожной системы мобильной связи (*Future Railway Mobile Communication System, FRMCS*). Даная сеть разрабатывается как комбинация двух сетей LTE плюс R. Участники конференции Международного союза железнодорожников *UIC* пришли к заключению, что следует придерживаться стандарта *GSM-R* и планировать его применение как минимум до 2030 года. Переход на сети пакетной коммутации *LTE* может быть начат не ранее 2023. К тому времени следует обратить особое внимание на вопросы распределения частот, так как это по-прежнему является серьезной проблемой для будущего, ведь ресурс радиочастот является ограниченным.

Сеть *LTE* позволяет обеспечить скорость загрузки до 326,4 Мбит/с, скорость отдачи до 172,8 Мбит/с, а задержка в передаче данных может быть снижена до 5 миллисекунд [3].

Компании уже предлагают оборудование сетей LTE, совместимое с *GSM-R* для совершения более плавного перехода к новой технологии. На нижеследующем рисунке представлена стратегия *Huawei Technologies*, состоящая из трех шагов[4]:

- 1) Только сеть *GSM-R*;

- 2) Одновременная работа сетей *GSM-R* и *LTE*: *GSM-R* обеспечивает надежную (зашифрованную) связь для управления поездами, *LTE* передает незащищенные данные;
- 3) Создается единая платформа “*LTE for railway*”.

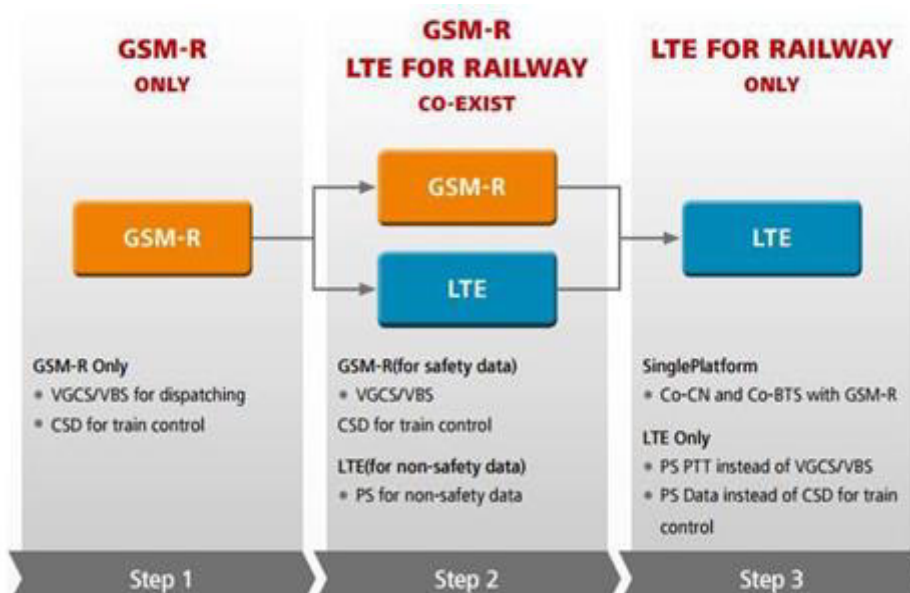


Рисунок 2 – Стратегия *Huawei Technologies*

В сентябре 2015 года был представлен первый в мире проект *LTE-R* для скоростной железной дороги в республике Корея на линии Вончжу-Каннын [5].



Рисунок 3 – Развитие системы беспроводной связи в Корее

Данный проект был успешно реализован, и в марте 2018 года проектируемый участок был открыт. Стоимость реализации – около 36 млн. долларов. Новый стандарт связи поддерживает специальные железнодорожные беспроводные услуги (передачу голоса, видео и больших данных) между поездами и станциями, упрощает эксплуатацию и техническое обслуживание поездов, а также предоставляет высокоскоростной интернет для пассажиров по *Wi-Fi*. Основными производителями оборудования выступили *Samsung Electronics*, *IPAGEON*, *ELUON*, *COVADA* (оборудование для командного сервера и диспетчерской), *Nokia* (оборудование доступа) и *HOIMYUNGICT* (бортовой блок).

После реализации проекта были произведены измерения параметров и характеристик новой сети. Результаты представлены на нижеследующем рисунке. Как видно, *LTE-R* открывает возможности для передачи различного вида трафика с высокой скоростью. К 2027 году планируется завершить внедрение данной технологии по всей Корее.

Категория	GSM-R	LTE-R
Охват	• Глобальный (Европа, Китай и т. д.)	• Республика Корея (первая в мире LTE-R для скоростной железной дороги на линии Вончжу-Каннын)
Пропускная способность	• Макс. 172 кбит/с (DL), 172 кбит/с (UL)	• В среднем DL 40 Мбит/с, UL 20 Мбит/с ※ ширина полосы 10 МГц
Услуга	• Голос и передача данных с низкой скоростью (Уровень II ETCS/ERTMS голосРТТ, не стандарт)	• Голос, видео, передача данных с высокой скоростью (видео+голос РТТ, стандарт MCPTT, MCPTT QCl69/Signaling, 65/Voice, 70/File applied) • Функциональная и зависящая от местоположения адресация

Рисунок 4 – Сравнение *GSM-R* и *LTE*

Дальнейшее совершенствование технологий связи предусматривает внедрение *5G* на железнодорожном транспорте по аналогии с *LTE-R* и *GSM-R*, однако вопрос о судьбе новейшей технологии остается открытым. Если спецификация *5G* будет завершена ранее перехода на сеть *LTE* плюс *R*, то преемником *GSM-R* может стать оборудование *5G*.

#### Список литературы

1. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G-R - состоится ли он? // Научная электронная библиотека «Киберленика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-zheleznaya-doroga-i-perehod-ot-seti-gsm-r-k-lte-r-i-5g-r-sostoitsya-li-on>.
2. Европейская система управления движением поездов // Википедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=102126218>.
3. LTE и WiFi // Викиконспекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=LTE\\_%D0%B8\\_WiFi&oldid=56965](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=LTE_%D0%B8_WiFi&oldid=56965).
4. Tingting, Gao A high-speed railway mobile communication system based on LTE / Gao Tingting; Sun Bin //Electronics and Information Engineering (ICEIE) International Conference. – 2010.
5. Первая в мире LTE-R для скоростной железной дороги (250 км/ч) в Республике Корея // ITU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/0a/0E/R0A0E0000C40001PDFR.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/0E/R0A0E0000C40001PDFR.pdf).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Демух Екатерина Витальевна**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студентка группы 25б, ОмГУПС.  
Тел.: +7 (999) 470-14-17.  
E-mail: katuffka.com@list.ru

**Платковский Роман Андреевич**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25б, ОмГУПС.  
Тел.: +7 (923) 038-41-25.  
E-mail: roma.platkovskiy@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Demukh Ekaterina Vitalievna**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b, OSTU.  
Phone: +7 (999) 470-14-17.  
E-mail: katuffka.com@list.ru

**Platkovskiy Roman Andreevich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b, OSTU.  
Phone: +7 (923) 038-41-25.  
E-mail: roma.platkovskiy@mail.ru

УДК 621.3

**А. С. Харитонов, Г. Л. Штрапенин**

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),  
г. Екатеринбург, Российская Федерация

## ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

***Аннотация.** Целью работы является создание экспериментального варианта программного обеспечения (ПО) для моделирования и оптимизации радиотехнических систем. Сформулированы специфические требования к программной среде, отвечающей заданным условиям, а именно – открытость архитектуры, возможность модификации, доступность и легкость освоения пользователями, не имеющими специальной подготовки. Программная среда была создана с использованием методологии функционального проектирования IDEF0, а программное обеспечение для симуляции электронных процессов – на основе доступных моделей и алгоритмов SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) версии spice.net. Оптимизационный модуль позволяет автоматически оптимизировать процесс моделирования в плане упрощения исходной схемы и стандартизации параметров ее элементов, что существенно снижает временные затраты на проектирование и конечную стоимость проекта.*

***Ключевые слова:** Радиотехнические системы, программное моделирование, оптимизация.*

**Anton S. Kharitonov, Gennady L. Shtrapenin**

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

## **SOFTWARE SIMULATION AND OPTIMIZATION OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS**

***Abstract.** The aim of the work is to create an experimental version of software for simulation and optimization of radio engineering systems. Specific requirements are formulated for a software environment that meets specified conditions, namely, the openness of the architecture, the possibility of modification, accessibility and ease of development by users who do not have special training. The software environment was created using the IDEF0 functional design methodology, and the software for the simulation of electronic processes was based on the available models and SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) algorithms spice.net version. The optimization module allows you to automatically optimize the simulating process in terms of simplifying the initial circuit and standardizing the parameters of its elements, which significantly reduces the time spent on design and the final cost of the project.*

***Keywords:** Radio engineering systems, software simulation, optimization.*

С целью достижения максимальной экономической эффективности и безопасности, а так же для минимизации временных затрат на создание, калибровку, анализ и модернизацию электронных радиотехнических систем и сетей различного уровня сложности требуется применение современных программных средств [1]. Данный подход позволяет оценивать работу будущего устройства через его виртуальную математическую модель, при этом корректная модель, созданная с достаточным уровнем точности, вполне способна заменить оригинальную систему или сеть практически на всех этапах разработки.

Рынок программного обеспечения (ПО) для моделирования и анализа электронных устройств весьма обширен. Большинство известного ПО разработано на основе общедоступных вычислительных алгоритмов SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Однако, несмотря на открытость исходного кода SPICE, ПО, созданное на его основе, не предполагает возможной индивидуальной пользовательской модификации и, как правило, ориентировано на успешное решение одной или нескольких определенных задач. Иными словами, пользователю, несмотря на обилие возможностей симулятора SPICE, приходится пользоваться лишь теми из них, которые выбрали и предоставили разработчики конкретного программного пакета. Следовательно, для корректной симуляции работы сложных электронных устройств необходимо использовать несколько различных

программных сред, что не рационально с ресурсозатратной точки зрения, а порой и вообще нереализуемо.

В данной работе предлагается прогрессивный вариант решения описанных выше проблем, который заключается в создании собственного оригинального программного обеспечения. Данное ПО позволяет, во-первых, реализовать решение всех требуемых задач с приемлемой точностью, и, во-вторых, модернизировать код и создавать макрокоманды для оптимизации процесса симуляции и экономии времени. Сильной стороной предложенного решения является и то, что пользователю предоставляется возможность самостоятельно устранить и ряд возможных косвенных проблем, например, связанных с характером графического представления выходных данных, интерфейсом среды или ее цветовым оформлением, имеющим индивидуальный характер и играющим важную роль при длительной работе с симулятором.

Для решения поставленной задачи вполне достаточны упомянутые выше популярные и общедоступные SPICE алгоритмы симуляции процессов, протекающих в электронных устройствах. Авторы проанализировали все существующие в настоящее время версии и модификации SPICE и остановились на версии 2017 года Spice.Net [2]. Существенной отличительной особенностью данной версией является ее структура, созданная посредством широко распространенного в российской образовательной системе объектно ориентированного языка программирования высокого уровня C#. Важно отметить и то, что Spice.Net распространяется по лицензии открытого программного обеспечения MIT, а значит предполагает неограниченные права использования, копирования, изменения, распространения, публикаций и сублицензирования ПО для любого, заполучившего его, программиста.

Создаваемое программное обеспечение имеет достаточно сложную структуру и организацию, поэтому было принято решение сделать его поточное функциональное описание, согласно которому была составлена функциональная модель программной среды, созданная с применением методологии функционального проектирования IDEF0. Данный подход подразумевает представление сложной системы как совокупности взаимосвязанных подсистем, рассматриваемых в нескольких уровнях приближения.

Первым этапом является самое общее представление проектируемой среды подобно «черному ящику» (уровень А-0, по структуре IDEF0), имеющему входные воздействия, выходной результат, реализацию и управление, как показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Представление программной среды в *IDEF0*, уровень *A-0*

Входным воздействием являются пользовательские данные: модели электротехнических элементов, источников питания и входных сигналов, их количество, параметры, схемные соединения и выбор необходимого типа анализа. Результатом работы системы будут графические и численные параметры, полученные в ходе проведения симуляции. Согласно поставленной задаче к системе предъявляются определенные требования, главные из которых: наличие моделей типовых пассивных элементов, полупроводниковых приборов и источников напряжения и тока, а также возможность выполнения классических для *SPICE* симулятора видов анализа и удобный пользовательский интерфейс.

На рис. 2 представлен наиболее информативный для данного проекта уровень *A0*, предполагающий рассмотрение проектируемой системы в первом приближении.

Все входные пользовательские данные о схеме и ее элементах вводятся в систему через подсистему «конструктор схем» *A1*. При необходимости редактирования моделей элементов с целью изменения их параметров, вызывается подсистема «настройка моделей» *A2*, в которую подаются текущие параметры из конструктора схем и которая возвращает новые измененные пользовательские параметры в конструктор схем. Далее, в зависимости от выбранного типа анализа, активируется одна из подсистем:

- анализ временных диаграмм *A3*;
- *AC* анализ *A4*;
- *DC* анализ *A5*.

Каждая из этих подсистем, получает обработанные конструктором схем данные, производит моделирование и по его окончанию выдает полученные графические или численные результаты. Механизмами реализации подсистем являются запрограммированные формы *Windows*, а в подсистемах, выполняющих моделирование, алгоритмы и модели *SPICE*.

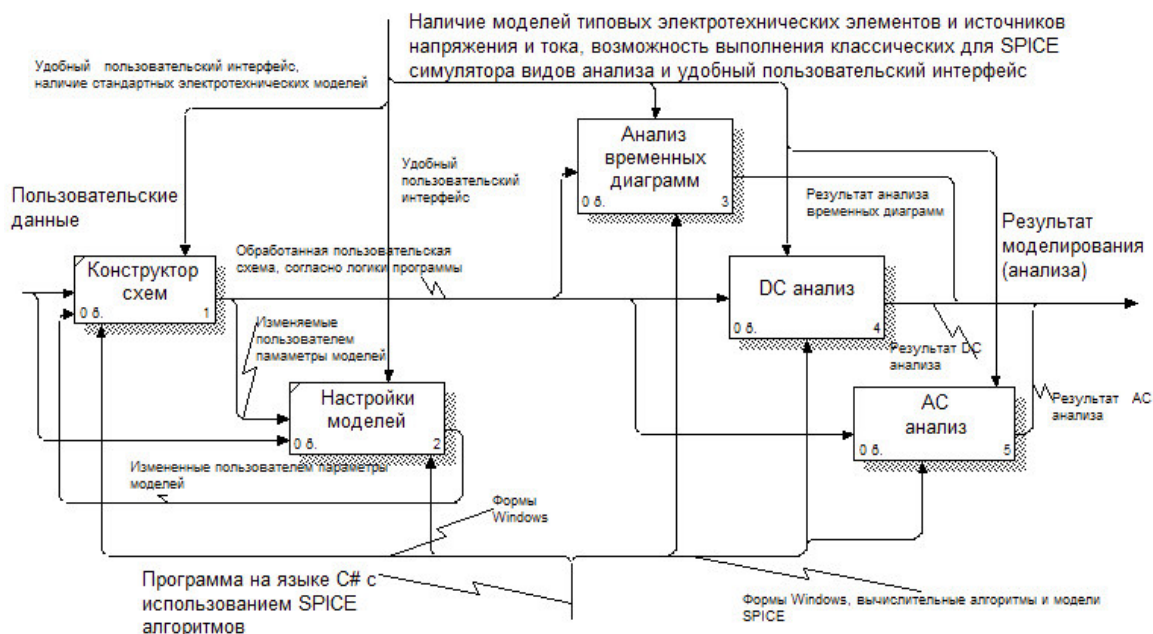


Рисунок 2 – Представление программной среды в *IDEF0*, уровень *A0*

Набор функций, реализованных в программном продукте, составляется исходя из индивидуальных потребностей авторов. Среда способна оперировать с базовыми, близкими к идеальным, моделями электротехнических элементов: резистор, конденсатор, катушка индуктивности, полупроводниковый диод, и позволяет моделировать устройства с источниками постоянных, переменных и импульсных напряжений [3].

Предусмотрены следующие, классические для *SPICE* симулятора, операции:

- построение временных диаграмм напряжений в узлах схемы;
- анализ по переменному току;
- анализ по постоянному току и построение передаточных характеристик.

Для более точного моделирования устройств с полупроводниковыми диодами предусмотрена возможность использования моделей реальных диодов, ПО включает в себя библиотеку стандартных моделей ряда диодов. Кроме того, реализован «Конструктор моделей», позволяющий пользователю самостоятельно создавать модели диодов и добавлять их в библиотеку для последующего применения в схеме. Окно конструктора моделей полупроводниковых диодов показано на рис. 3.

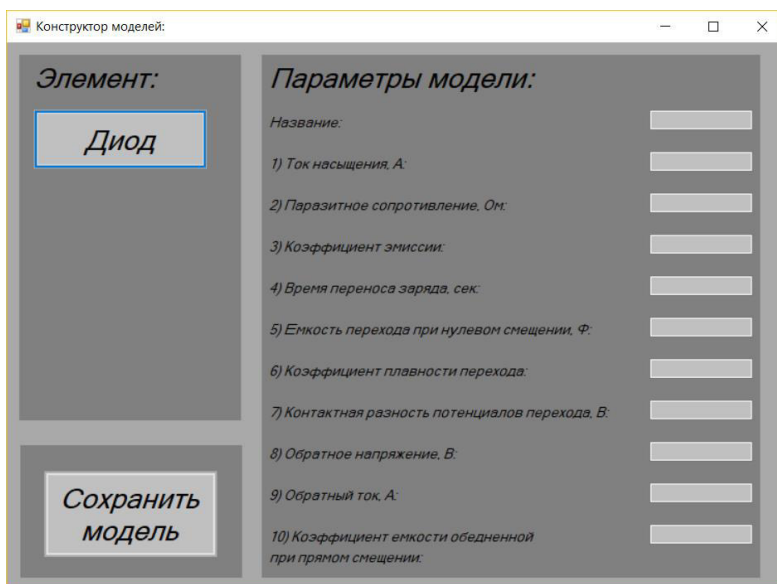


Рисунок 3 – Интерфейс конструктора моделей

В качестве примера для проверки работоспособности созданного программного обеспечения на рис. 4 приведена схема интегрирующей цепи –  $RC$  фильтра нижних частот, через которую пропускается импульсный сигнал.

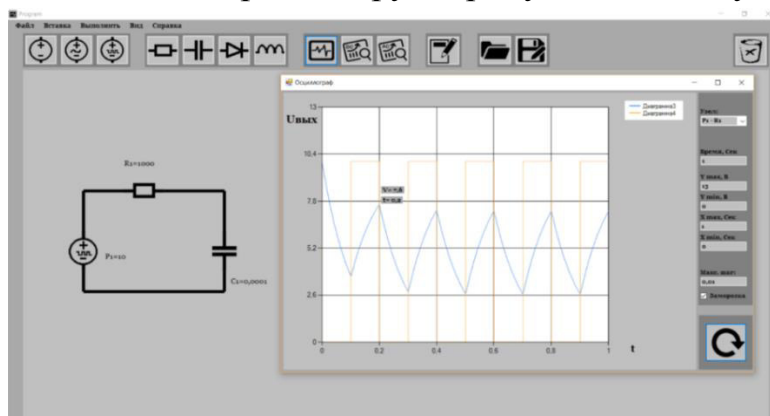


Рисунок 4 – Демонстрация работы программной среды

Как видно из результирующего графика, выходное напряжение пропорционально интегралу входного напряжения, что свидетельствует о корректном моделировании работы  $RC$  цепи.

В процессе моделирования радиотехнических систем может возникнуть потребность не просто проанализировать работу электронного устройства, но и провести оптимизацию его схемы и стандартизацию параметров элементной базы с целью исключения избыточностей и ускорения процесса симуляции. Для решения подобных задач было создано дополнение к описанному выше ПО в виде специального программного модуля, интерфейс которого с примером данных для оптимизации схемы представлен на рис. 5.

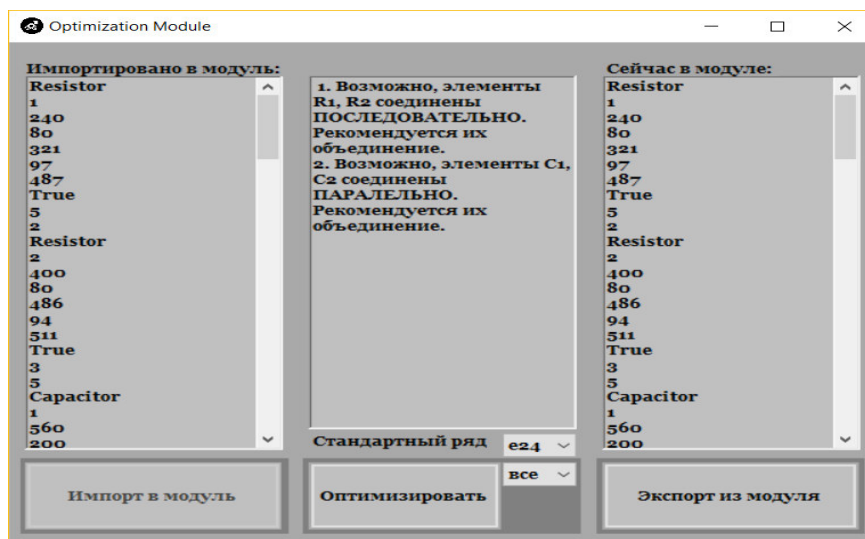


Рисунок 5 – Модуль оптимизации электрической схемы

Импортирование схемы в модуль оптимизации возможно прямо из основной программы через генерируемый файл с расширением .prg. Язык описания электрической схемы создан авторами самостоятельно и является упрощенной версией классического языка SPICE.

Оптимизация схемы производится по следующим параметрам:

1. Поиск и устранение элементов, не подключенных к схеме или замкнутых на самих себя.
2. Поиск и устранение групп параллельно соединенных элементов.
3. Поиск и устранение групп последовательно соединенных элементов.
4. Анализ элементной базы схемы и приведение параметров ее элементов к определенным значениям согласно стандартным электротехническим рядам из пополняемой пользовательской библиотеки.

Разработанный программный продукт отличается легкостью обращения и обладает абсолютно открытой архитектурой. Пользователь, владеющий навыками программирования среднего уровня на объектно ориентированном языке C# без особого труда сможет модернизировать представленный программный продукт исходя из своих конкретных задач и предпочтений. Представленный прототип ПО полностью исключает ограничения большинства существующих программ для моделирования радиотехнических систем и может быть использован в составе любой универсальной или специализированной программно-аппаратной среды для разработки различных устройств.

#### Список литературы

1. Головков, А. А. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств. Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения / А. А. Головков, И. Ю. Пивоваров, И. Р. Кузнецов. – СПб.: Питер, 2015. – 208 с.

2. Spicenet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.codeplex.com> (Дата обращения 11.09.2019).

3. Харитонов, А. С. Разработка программного обеспечения для моделирования электронных устройств для транспортной отрасли на базе вычислительных алгоритмов SPICE / А. С. Харитонов, Г. Л. Штрапенин // Инновационный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 45 – 48.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Харитонов Антон Сергеевич**

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).  
Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.  
Магистрант механического факультета УрГУПС.  
Тел.: +79505620242  
E-mail: the-best2012@mail.ru

##### **Штрапенин Геннадий Львович**

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).  
Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.  
Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрические машины» УрГУПС.  
Тел.: +79024407755  
E-mail: shtrap@mail.ru

УДК 656.254.4

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Kharitonov Anton Sergeevich**

Ural State University of Railway Transport (USURT).  
66, Kolmogorova St., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.  
Graduate student at the mechanical department USURT.  
Phone: +79505620242  
E-mail: the-best2012@mail.ru

##### **Shtrapenin Gennady Lvovich**

Ural State University of Railway Transport (USURT).  
66, Kolmogorova St., Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.  
PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the department «Electrical Machines» USURT.  
Phone: +79024407755  
E-mail: shtrap@mail.ru

#### **А. С. Валенко, В. С. Ядрышников**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

### **ОЦЕНКА И УСТРАНЕНИЕ ЗОН РАДИОТЕНИ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

*Аннотация.* В статье рассматривается проблема оценки и устранения зон радиотени поездной радиосвязи на железнодорожных линиях в сложных условиях рельефа. Представлен подход к оценке границ зон радиотени на местности по данным инструментальных измерений. Разработаны предложения по устранению затененных областей с использованием активных и пассивных ретрансляторов радиосигнала. Авторы полагают, что результаты работы применимы к проектированию новых и модернизации существующих линий поездной радиосвязи диапазонов МВ и ДМВ.

**Ключевые слова:** *поездная радиосвязь, зоны радиотени, ретрансляторы.*

## **ASSESSMENT AND ELIMINATION OF TRAIN RADIO SHADOW AREAS**

***Abstract.** The article deals with the problem of assessment and eliminating radio shadow areas of train radio communications on railway lines laid in difficult terrain conditions. An approach to assessing the boundaries of the radio shadow areas according to instrumental measurements is presented. Suggestions have been developed for eliminating shaded areas involving the use of active and passive radio signal repeaters. The authors believe that the results of the work are applicable for designing of new and modernization of existing train radio links of the VHF and UHF ranges.*

***Keywords:** train radio communications, radio shadow areas, radio repeaters.*

Одной из неотъемлемых составляющих эксплуатации железнодорожного транспорта является радиосвязь. Ее применение необходимо при работе с подвижным составом для организации связи диспетчера, управляющего процессом движения, с машинистами поездов.

В диапазонах МВ и ДМВ обеспечение качественной радиосвязи с перемещающимся локомотивом не всегда возможно ввиду особенностей рельефа. В некоторых случаях связь оказывается затруднена из-за наличия естественных препятствий между станцией и подвижным составом.

В настоящем докладе приведен графоаналитический подход к оценке зон радиотени и определению их границ на участках железных дорог со сложным рельефом, а также способ устранения таких зон путем применения ретрансляторов.

В качестве исходных данных для определения границ зон радиотени предлагается использовать результаты исследования вагона-лаборатории, проводимые на участках железных дорог на регулярной основе, путем сопоставления их с топографической картой.

Схожую с поездной радиосвязью организацию имеют радиорелейные линии связи. Однако известные методы их проектирования малопригодны, поскольку при их применении рассматривается профиль одного прямолинейного участка, а зоны радиотени, расположенные вдоль участка следования подвижного состава, могут находиться не на одной прямой линии.

Поэтому предлагается использование метода характерных точек рельефа. Его суть заключается в том, чтобы определить вблизи зоны радиотени характерные точки высот, с которых весь затененный участок перекрывается линиями прямой радиовидимости.

На участках железных дорог ежеквартально проводятся инструментальные измерения уровня принимаемого радиосигнала по ходу следования подвижного состава. Результаты этих измерений помогают определить участки пути, на которых не обеспечивается достаточный уровень сигнала, передаваемого радиопередатчиками ближайших железнодорожных станций. Сопоставив эти данные с топографической картой в рамках программной системы соответствующей геоинформационной платформы, можно установить топографические границы зоны радиотени и их взаимосвязь с окружающим рельефом.

В качестве примера предлагаются результаты измерений уровня радиосигнала, проведенных вагоном-лабораторией на участке железнодорожной линии «Артышта-2» – «Аламбай». Согласно протоколу измерений, отрезок пути, расположенный от железнодорожной станции «Аламбай» на расстоянии от 8 до 19 км, представляет собой зону радиотени, уровень сигнала в которой ниже допустимого.

Протокол измерений не позволяет определить топографические причины и условия возникновения тени, поскольку не отражает характера местности. Для количественной оценки влияния рельефа участок с низким уровнем сигнала необходимо перенести на топографическую карту для определения взаимного расположения линии пути и характерных точек рельефа.

Для реализации метода необходимо использовать два масштаба карты. Мелкий масштаб, представленный на рис. 1, следует использовать для определения рельефа участка между базовой станцией и ретрансляторами, а крупный (рис. 2) – для оценки прямой радиовидимости между ретранслятором и наиболее отдаленными от него точками затененного участка. На указанных рисунках синей линией обозначен исследуемый участок железной дороги, а красной – участок с недостаточным уровнем радиосигнала.

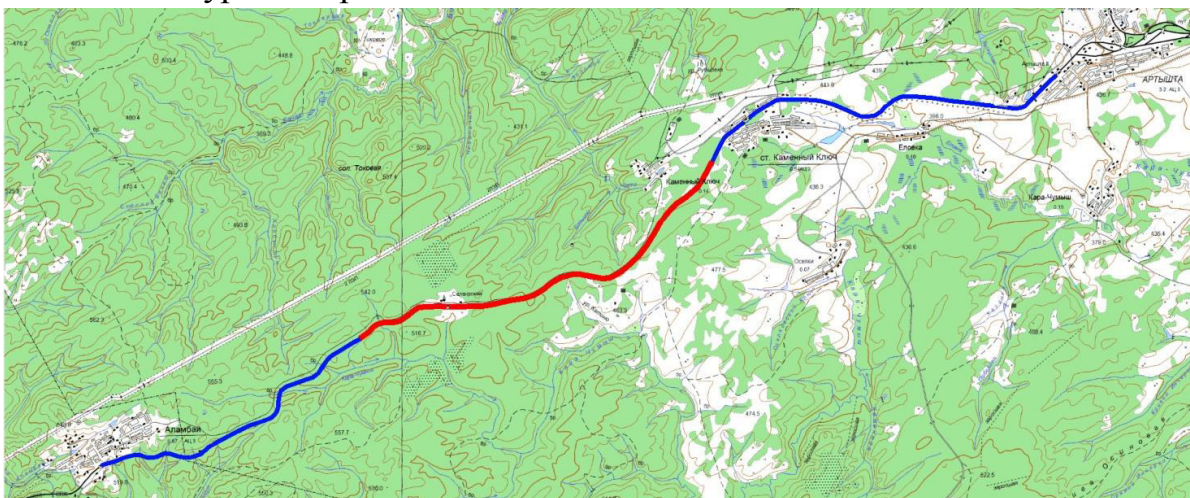


Рисунок 1 – Топографическая карта мелкого масштаба с указанием исследуемого и затененного участков

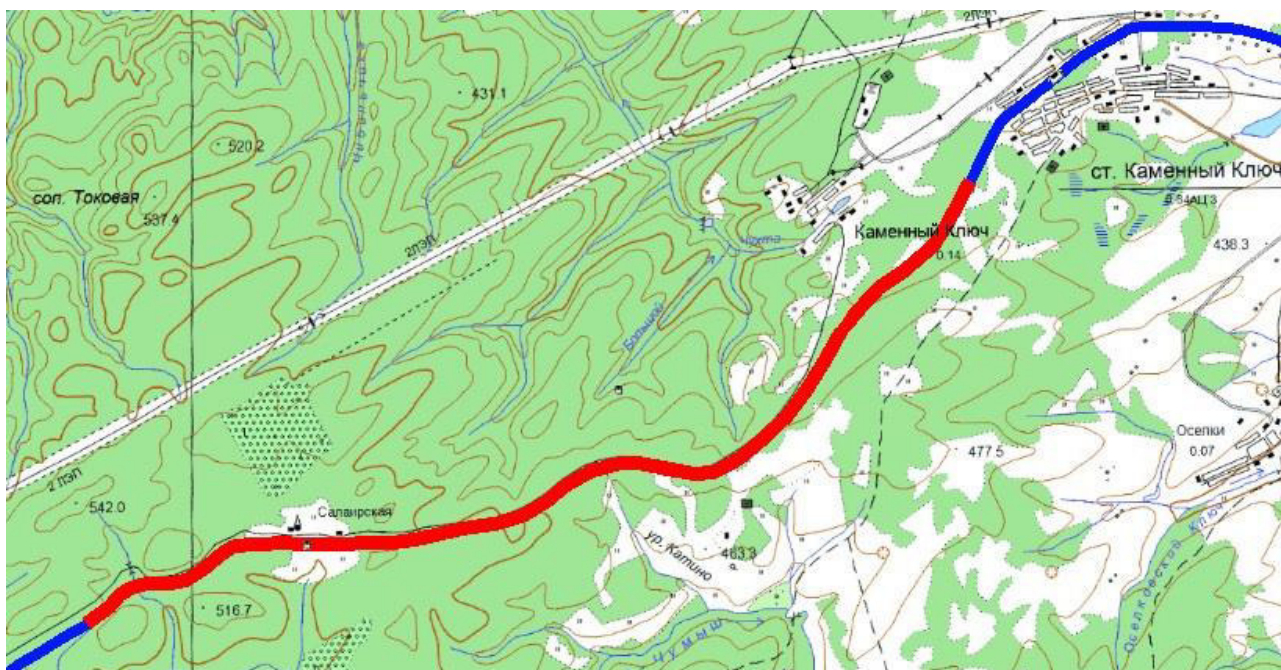


Рисунок 2 – Топографическая карта крупного масштаба с указанием затененного участка

В качестве решения проблемы перекрытия зон радиотени в данной работе предлагается применение активных и пассивных ретрансляторов. При этом существуют два важнейших условия их работы. Для активных ретрансляторов расстояние до стационарной радиостанции при распространении сигнала по прямой должно определяться таким образом, чтобы уровень этого сигнала не опускался ниже уровня чувствительности приемника ретранслятора.

Методически для активных ретрансляторов с антенной, имеющей круговую диаграмму направленности, выбирается любая характерная точка рельефа вблизи зоны радиотени, обеспечивающая необходимый уровень сигнала на входе ретранслятора и прямую видимость от антенны ретранслятора до любой точки железнодорожной линии в зоне радиотени.

Для пассивных ретрансляторов в большинстве случаев могут быть выбраны только те точки, которые находятся между базовой станцией и зоной радиотени и обеспечивают наложение зоны обслуживания пассивного ретранслятора на участок железнодорожной линии, находящийся в зоне радиотени. При этом следует учитывать ширину диаграммы направленности ретранслятора и соотношение зоны обслуживания и затененной области.

Активные ретрансляторы отличаются тем, что содержат комплекс приемопередающей аппаратуры и требуют наличия линий электропередачи. На пассивных ретрансляторах отсутствует какая-либо аппаратура, а прием и передача осуществляются соответствующим образом выполненными антенными системами.

По этой причине пассивные ретрансляторы могут быть установлены независимо от линий электропередачи и другой инфраструктуры за исключением мачтовых сооружений, следовательно, при их применении значительно сокращаются затраты на строительство и эксплуатацию систем связи [1].

Эффективность пассивного ретранслятора существенно зависит от расстояния до базовой станции. Напряженность поля, создаваемую такими ретрансляторами, можно вычислить по приведенной ниже методике [2].

Мощность на выходе приемной антенны ретранслятора  $P_2$ , Вт, определяется по формуле:

$$P_2 = \frac{P_{\Sigma} D_1 D_2 \lambda^2}{(4\pi r_1)^2}, \quad (1)$$

где  $D_1$  – коэффициент усиления передающей антенны стационарной радиостанции;

$D_2$  – коэффициент усиления приемной антенны ретранслятора;

$r_1$  – расстояние от стационарной антенны до ретранслятора, м.

Затем определяется мощность на выходе передающей антенны ретранслятора  $P_3$ , Вт:

$$P_3 = \frac{P_2 D_2}{D_3}, \quad (2)$$

где  $D_3$  – коэффициент затухания на схеме передачи и на фидере.

Пересчет напряженности поля, создаваемой ретранслятором, осуществляется через вектор Пойнтинга  $\Pi_3$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$\Pi_3 = \frac{P_3 D_2}{4\pi r_2^2}, \quad (3)$$

$$E_3 = \sqrt{377 \Pi_3}, \quad (4)$$

где  $r_2$  – расстояние от ретранслятора до локомотивной антенны, м.

Как видно из рис. 3, чем дальше от стационарной радиостанции находится пассивный ретранслятор, тем быстрее затухает сигнал, передаваемый им, и тем меньше расстояние, на котором ретранслятор способен поддерживать необходимый уровень этого сигнала.

Исходя из вышесказанного, можно постановить, что расположение пассивного ретранслятора необходимо выбирать таким образом, чтобы расстояние между ним и базовой станцией было наименьшим.

Пример расположения ретрансляторов приведен на рис. 4. Красной линией обозначен затененный участок. Красные значки отображают место размещения активных ретрансляторов, синие значки – пассивных ретрансляторов.

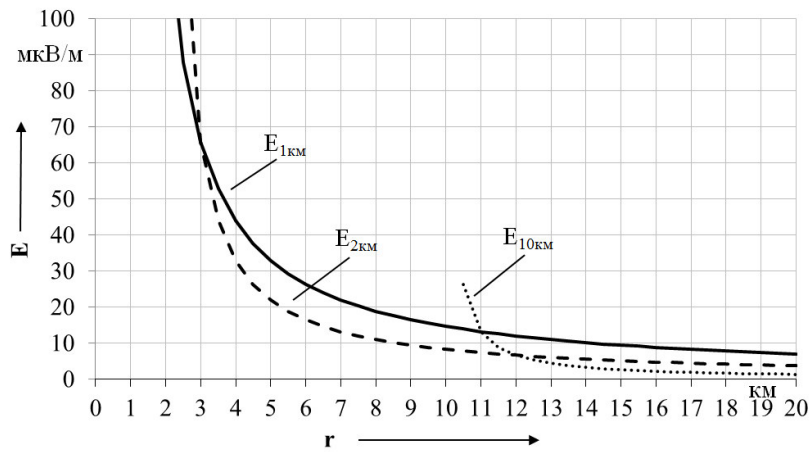


Рисунок 3 – Графики затухания напряженности поля  $E$  пассивных ретрансляторов, находящихся на расстоянии 1 км, 2 км и 10 км от антенны стационарной радиостанции, при частоте сигнала равной 900 МГц

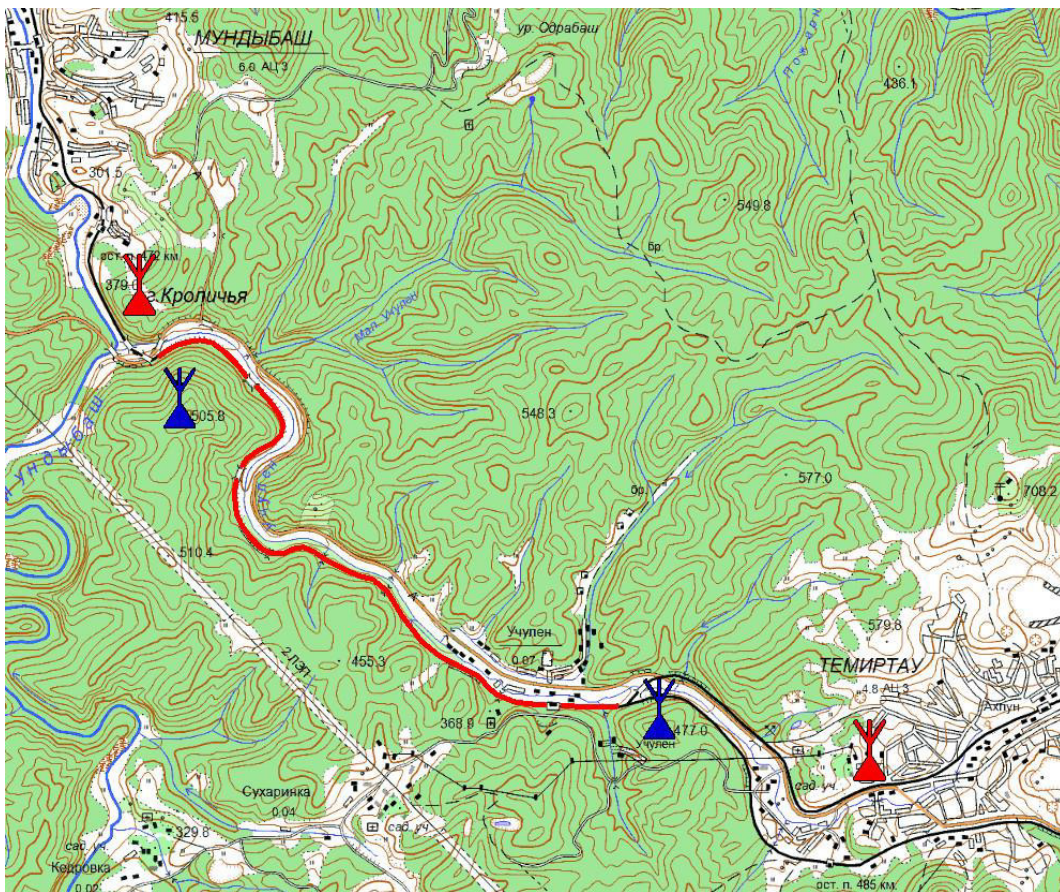


Рисунок 4 – Пример размещения ретрансляторов

Как видно из примера, активные ретрансляторы расположены вблизи инфраструктуры, причем ретранслятор, находящийся на окраине поселка Мундыбаш, предлагается установить непосредственно на наивысшую точку горы Кроличья, а размещенный в поселке Темиртау – на мачте, сооруженной на

здании. Пассивные ретрансляторы необходимо расположить на характерных точках между зоной радиотени и активными ретрансляторами на расстоянии около двух километров от последних. В этом случае в любой точке затененного участка обеспечивается связь хотя бы с одной из железнодорожных станций, находящихся в вышеуказанных населенных пунктах.

Результаты выполненной работы показывают, что для внедрения любых стандартов радиосвязи диапазонов МВ и ДМВ на участках железных дорог со сложным рельефом и зонами радиотени большой протяженности необходимы специальные методы анализа рельефа и синтеза комбинированных радиолиний с активными и пассивными ретрансляторами.

Предложенная качественная методика с использованием алгоритмов и служб одного из геоинформационных программных комплексов может обеспечить высокопроизводительный и эффективный способ выбора и применения дополнительного оборудования радиосвязи для исключения радиотени на участках железной дороги.

#### Список литературы

1. Айзенберг, Г. З. УКВ. В 2 ч. / Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский, О. Н. Терешин. – М.: Связь, 1977. – Ч.2. – 288с.
2. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн: Учебник для вузов / М. П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Валенко Алексей Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25 В кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (923) 693-31-58.  
E-mail: lekr0n@yandex.ru

##### **Ядрышников Виктор Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25 В кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС  
Тел.: +7 (913) 143-92-87.  
E-mail: 1211064@gmail.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Valenko Aleksei Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student at the department «Telecommunication,  
radio engineering systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (923) 693-31-58.  
E-mail: lekr0n@yandex.ru

##### **Yadryshnikov Viktor Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student at the department «Telecommunication,  
radio engineering systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (913) 143-92-87.  
E-mail: 1211064@gmail.com

**И. С. Балашов**

АО «ОНИИП», г. Омск, Российская Федерация

**СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТОВ ТРАНКИНГОВЫХ  
СЕТЕЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ СИГНАЛОВ ОТ  
СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

*Аннотация.* Данная статья посвящена проблеме позиционирования мобильных терминалов связи в условиях отсутствия сигналов от спутниковых систем GPS/GLONAS, предложен способ использования имитатора сигналов спутников геопозиционирования для решения подобных задач.

*Ключевые слова:* транкинговые системы связи, позиционирование.

**Igor S. Balashov**

JSC «ONIP», Omsk, the Russian Federathion

**WAYS TO SOLVE PROBLEMS OF DETERMINING THE LOCATION OF  
MOBILE SUBSCRIBERS OF TRANKING COMMUNICATIONS  
NETWORKS IN THE CONDITIONS OF NO SIGNALS FROM SATELLITE  
OF GLOBAL POSITIONING**

*Abstract.* This article is devoted to the problem of positioning mobile communication terminals in the absence of signals from GPS / GLONAS satellite systems. A method for using a satellite signal simulator for solving similar problems is proposed.

*Keywords:* trunking communication systems, positioning

Современные транкинговые системы связи, то есть системы с автоматическим распределением радиоканалов между абонентами, способны передавать по радиointерфейсу сигналы, содержащие информацию об их местоположении. Как правило, абонентская радиостанция получает данные о своем местоположении от систем глобального позиционирования (спутники GPS, ГЛОНАСС) и передает их по контрольному каналу в инфраструктуру системы связи. На таком принципе построена передача координат в транкинговых системах связи TETRA, DMR, APCO25.

В виду того, что транкинговые системы связи являются профессиональной мобильной радиосвязью и используются в качестве устройств критических телекоммуникаций, их часто применяют на объектах шахтного типа, где приём сигналов от спутников глобального позиционирования невозможен.

Также существуют морские нефтедобывающие платформы, которые имеют большое количество закрытых экранированных помещений.

Задача определения местоположения абонентов в таких ситуациях решается несколькими способами:

Установка репитера спутникового сигнала. От принимающей антенны спутникового сигнала спускается фидер в помещение, где устанавливается репитер, как показано на рис. 1.

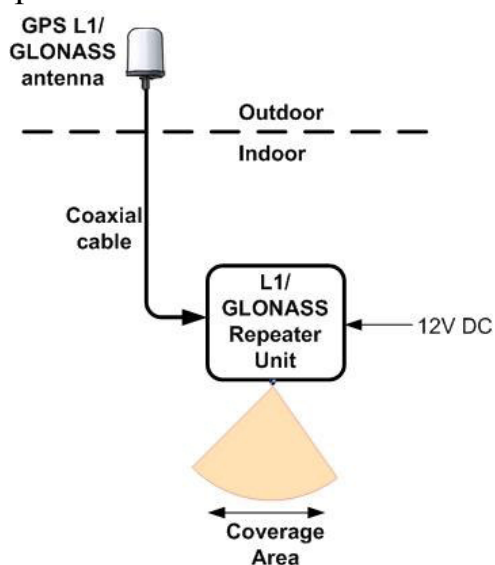


Рисунок 1 – Схема установки репитера спутникового сигнала

Главный недостаток данного решения: необходима установка репитера и антенны к нему в каждое помещение.

Метки iBeacon, на основе технологии Bluetooth. В помещения устанавливаются излучатели сигнала Bluetooth, которые принимает абонентская станция и отправляет в инфраструктуру сети, где идет распознавание и определение местоположения абонента внутри помещения. Следует отметить, данное решение может использовать метод триангуляции от нескольких источников сигнала Bluetooth, как показано на рис. 2, что повышает точность определения местоположения абонента. Недостаток данной технологии: необходима доработка абонентской радиостанции, для встраивания приемника Bluetooth, также необходимы внесения изменений в алгоритмы работы абонентского и базового оборудования системы связи.

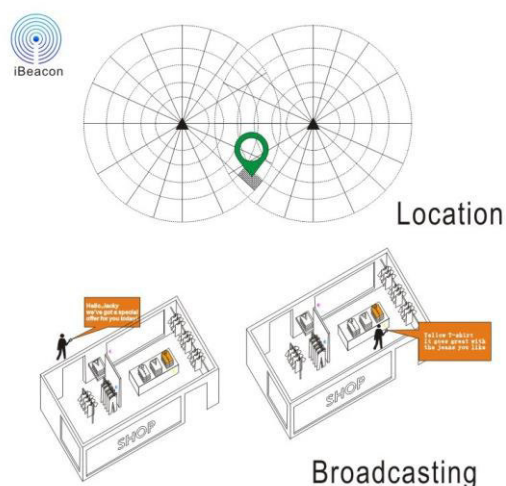


Рисунок 2 – Схема работы меток iBeacon

Индуктивные датчики. В переходах между помещений устанавливаются индуктивные рамки, как показано на рис. 3, которые передают на встроенный в абонентскую станцию приёмник данные о смене помещения. Далее трубка передает данные по радиointерфейсу в инфраструктуру системы связи. Недостатки данного решения схожи с недостатками решения на основе Bluetooth-технологии.

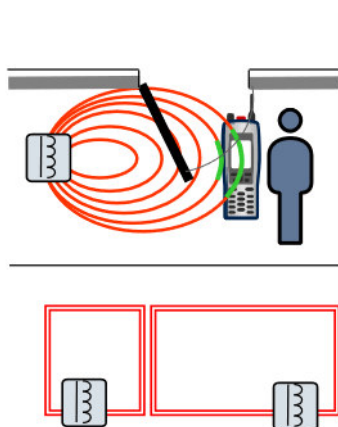


Рисунок 3 – Схема работы индуктивных датчиков

Предлагаемый способ:

- Создание излучающей метки координат, на основе SDR-модуля, метка передаёт заранее запрограммированные координаты
- Абонентская станция с приёмником для сигналов геопозиционирования принимает координату и передаёт в систему связи
- Система связи передаёт координату на сервер обработки данных.
- Сервер обработки данных соотносит полученную координату с помещением или местом и отправляет результат оператору АРМ

На рис. 4 представлена схема взаимодействия компонентов предлагаемого решения.

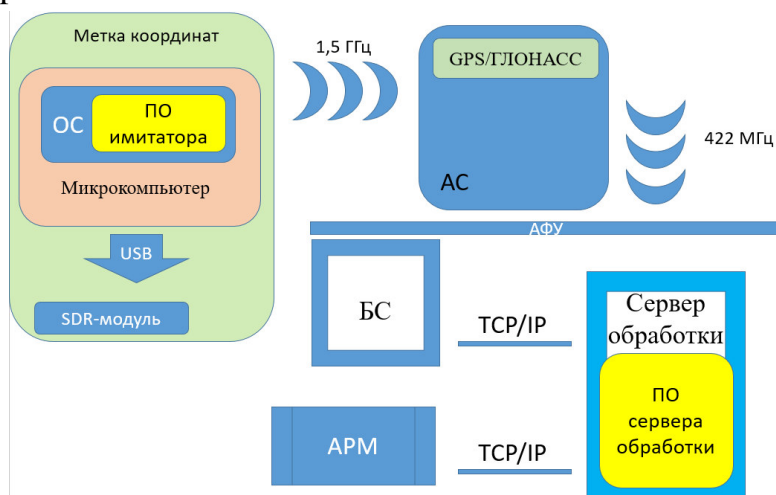


Рисунок 4 – Схема взаимодействия имитатора сигнала с транкинговой системой связи

Программное обеспечение имитатора координаты передает на излучающий модуль ложные данные позиционирования, далее в виде радиосигнала их принимает приёмник сигналов позиционирования, встроенный в абонентскую радиостанцию. Радиостанция, в свою очередь, передает ложную координату в инфраструктуру системы связи, где она интерпретируется на пульте отображения местоположения абонентов в виде конкретного помещения или места в шахтном объекте. Таким образом, данное решение не требует дополнительных затрат на оснащение абонентского оборудования дополнительными приёмниками сигналов, используется уже имеющийся приёмник сигналов глобального геопозиционирования. Кроме того, не требуется доработка ПО инфраструктурного оборудования, так как используются функциональные возможности заложенные в инфраструктуре оборудования.

При реализации данного способа возникает ряд задач:

- SDR-модули имеют высокую стоимость, в среднем 5-50 тысяч руб. Возможное решение: ввиду ограниченности требуемого диапазона 1,5 ГГц, разработка собственного излучающего модуля.
- Требуется решить проблему переработки альманаха кодов сигналов спутника и передачи требуемой последовательности кодов на излучатель. Возможное решение: использование открытого ПО имитации сигналов или разработка собственного ПО.
- При переходе от одной метки к другой возможна значительная задержка в анализе полученной последовательности кодов спутника. Возможное решение:

использование координат с шагом до 100 метров, тогда будет происходить эмуляция обычного перемещения объекта по поверхности Земли.

- При появлении АС на поверхности или в зонах смежных с ней, есть вероятность приёма реальных координат. Возможное решение: наложение ограничений интерпретацию координат с помощью ПО на сервере обработки.

Использование предложенного способа определения местоположения абонентов может использоваться и в качестве системы навигации для пассажиров метро. Так как в каждом современном мобильном телефоне есть приемник сигналов геопозиционирования, пассажиры могут с помощью вспомогательного приложения получать необходимую информацию о своем местоположении, инструкции по эвакуации в случаях чрезвычайных происшествий.

Существующие способы обнаружения абонентов транкинговых систем связи в условиях отсутствия сигналов глобального позиционирования требуют внесения изменений в абонентское и базовое оборудование, что влечет дополнительные затраты. Использование имитатора сигнала с ложными координатами, способно решить задачи по обнаружению абонентов без подобных изменений в оборудовании. Таким образом, предлагаемый способ может повысить функциональность транкинговых систем связи, без значительных затрат.

#### Список литературы

1. ГЛОНАСС. Интерфейсный контроль. – М: РНИИКП, 2017. 78с.
2. Скрыпник, О. Н. Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS SIMULATION TOOLKIT / О. Н. Скрыпник, Е. Е. Нечаев, Р. О. Арефьев // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – №2009(11). – С. 5 – 12
3. Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации / Ю. А. Соловьев. – М: Эко-Трендз, 215. – 270 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

##### **Балашов Игорь Сергеевич**

Акционерной общество «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «ОНИИП»)  
Масленникова ул., 231, г. Омск, 644009,  
Российская федерация.  
Начальник сектора отдела гражданской продукции АО «ОНИИП».  
Тел. +7(3812) 90-68-51.  
E-mail: tetra@oniip.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

##### **Balashov Igor Sergeevich**

Joint Stock Company «Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya» (JSC «ONIIP»)  
Maslennikova st., 231, Omsk, 644009,  
the Russian Federation.  
Head of the sector of the civil products department of JSC ONIIP.  
Phone. +7(3812) 90-68-51.  
E-mail: tetra@oniip.ru

**А. В. Ряполов, Д. А. Гредяев, Н. В. Фамбулов**

РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Российская Федерация.

## **МОДЕЛЬ ПРИЕМНОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

***Аннотация.** В статье представлена модель антенной решетки, предназначенной для приема сигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем. В модели использовано несколько этапов расчета: задание навигационных сигналов и помех, определение методами электродинамического моделирования характеристик антенных элементов решетки, применение способов управления диаграммой направленности для максимизации мощности полезных сигналов и ослабления помех, задействование программной постобработки для первичной обработки навигационных сигналов с целью определения соотношения сигнал/шум.*

***Ключевые слова:** спутниковая навигация, антенная решетка, диаграмма направленности, ГЛОНАСС, помеха.*

**Artyom V. Ryapolov, Dmitry A. Gredyaev, Nikolay V. Fambulov**

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of technical Physics,  
Snezhinsk, the Russian Federation

## **MODEL OF RECEIVING GNSS ANTENNA ARRAY WITH DIGITAL BEAMFORMING**

***Abstract.** In this article a complex model of antenna array for global navigation satellite systems is presented. This model consists of several stages. First stage intended for creating GLONASS signals and interferences of different kind. Second stage performs electromagnetic calculations of antenna array elements. Third stage consists of several algorithms for digital beamforming which aim to maximize power of the navigation signals and suppress unwanted interferences. Last stage is a software-defined receiver where operations of acquisition and tracking are performed. Some results of calculations are also presented.*

***Keywords:** global satellite navigation systems, antenna array, beamforming, interference, MVDR, STAP.*

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) находят обширное применение в различных отраслях. Малый уровень принимаемых навигационных сигналов делает их уязвимыми к радиопомехам в рабочей

области частот, что ведет к необходимости использовать помехозащищенные приемники спутниковой навигации. Наиболее эффективно повысить живучесть приемной навигационной аппаратуры можно при помощи антенных решеток (АР), которые позволяют решить две задачи: увеличить уровень полезных сигналов и ослабить воздействие возможных радиопомех, попадающих в рабочий диапазон частот. Первая задача решается путем формирования лучей диаграммы направленности (ДН) в сторону навигационных спутников. Вторая – созданием провалов (нулей) ДН в направлении помех.

В данной работе рассматривается модель антенной решетки для приема сигналов отечественной СРНС ГЛОНАСС. Ее краткая структурная схема показана на рис. 1.

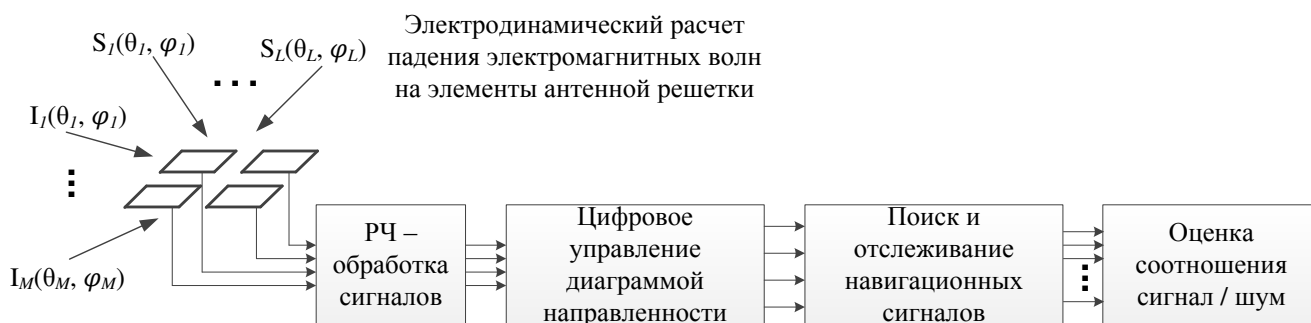


Рисунок 1 – Структурная схема модели антенной решетки

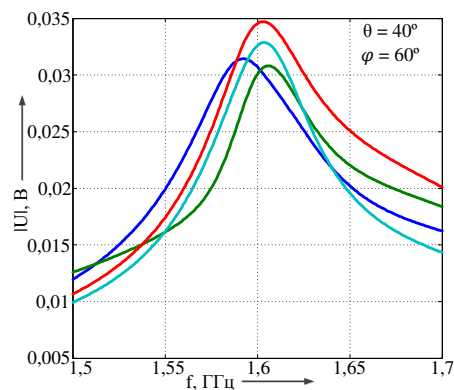
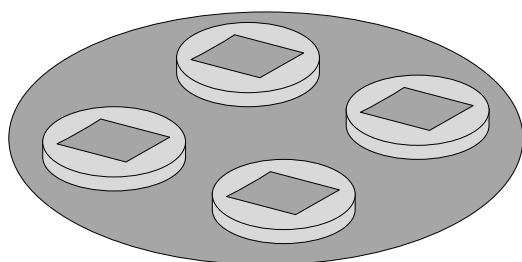
Изначально была создана трехмерная модель полотна АР, где были размещены патч-антенны, работающие в диапазоне частот 1590-1610 МГц СРНС ГЛОНАСС L1 (рис. 2а). В данной работе приводится вариант построения плоской АР из четырех антенн, расположенных в вершинах квадрата с длиной ребра 94 мм, что соответствует половине длины волны на частоте 1600 МГц. Было выполнено численное моделирование полученной трехмерной конструкции с применением методов вычислительной электродинамики [1]. Определялись напряжения, которые возникают в портах антенн при воздействии на АР плоских волн правой круговой поляризации с различных направлений азимута и угла места напряженностью 1 В/м в диапазоне частот 1500-1700 МГц. Пример амплитудно-частотных зависимостей наведенных напряжений при воздействии электромагнитной волны с направления  $\theta = 40^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$  показан на рис. 2б.

Далее были сформированы временные зависимости навигационных сигналов ГЛОНАСС в диапазоне L1 [2]. Навигационные сигналы задавались как безразмерные зависимости с единичной амплитудой. Напряжение, создаваемое навигационным сигналом в порту антенны, вычислялось в

результате перемножения его спектра и комплексной частотной зависимости напряжения. Суммарный сигнал на выходе  $k$ -го антенного элемента, В:

$$x_k(t) = \sum_{l=1}^L F^{-1}(h F(s_l(t)) U_k(\theta_l, \varphi_l, f)) + \sum_{m=1}^M F^{-1}(h F(i_m(t)) U_k(\theta_m, \varphi_m, f)) + n(t), \quad (1)$$

где  $s_l(t)$  – навигационный сигнал  $l$ -го спутника;  $i_m(t)$  – помеха от  $m$ -го источника;  $U_k(\theta_l, \varphi_l, f)$ ,  $U_k(\theta_m, \varphi_m, f)$  – частотные зависимости напряжения в порту  $k$ -го антенного элемента при приеме сигнала и помехи в соответствующих направлениях;  $F, F^{-1}$  – операции прямого и обратного преобразования Фурье;  $L, M$  – общее число спутниковых сигналов и помех соответственно;  $n(t)$  – собственный шум антенны;  $h$  – масштабирующий множитель, который задает, чтобы при падении электромагнитной волны, переносящей навигационный сигнал, на антенну под углом  $5^\circ$  к горизонту в ее порту выделялась мощность -131 дБм [2].



а)

б)

Рисунок 2 – Антенная решетка СРНС:

а – трехмерная модель для электродинамического расчета;

б – модуль напряжения в портах антенных элементов

Расчет наводимых в портах антенн напряжений от помех выполнялся по тому же порядку, что и для навигационных сигналов. В данной модели полоса рабочих частот задавалась равной 20 МГц (1590 – 1610 МГц), что выражается в мощности шума, равной приблизительно – 100 дБм [2]. При этом мощности принимаемых навигационных радиосигналов были значительно меньше и составляли около – 130 дБм.

Дальнейший этап обработки сигналов выполнял их перенос в область промежуточной частоты (ПЧ) 0 – 20 МГц и усиление на 90 – 100 дБ, что соответствует показателям реальных радиоприемных устройств для СРНС.

На следующем этапе модели сформированные сигналы от антенных элементов АР подвергаются обработке, реализующей цифровое управление ДН. Было выбрано несколько часто встречающихся вариантов обработки сигналов в АР для СРНС, чтобы затем иметь возможность провести сравнительный анализ между ними по результирующему соотношению сигнал/шум ( $C/N_0$ ).

Первый вариант управления ДН – введение линейных ограничений (Linear Constrained Minimum Variance, LCMV), позволяющее формировать луч в указанном направлении при одновременном задании ( $N-1$ ) независимых нулей, где  $N$  – число антенных элементов АР [3]. Во всех рассмотренных вариантах, кроме антенного компенсатора, применялось формирование четырех лучей, равномерно разбивающих верхнюю полусферу пространства, откуда принимаются навигационные сигналы.

Выходной сигнал каждого из лучей АР определяется выражением:

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{X}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_m]^H$  – вектор весовых коэффициентов для формирования соответствующего луча с учетом задания нуля в направлении помехи;  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m]^H$  – матрица векторов выборок сигналов от антенных элементов.

Второй вариант управления ДН основан на минимизации дисперсии шума при постоянном усилении в заданном направлении (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR, метод Кейпона) [3, 4]. Данный подход также использует линейные ограничения при формировании лучей, но при этом производит оценку сигнальной обстановки путем вычисления ковариационной матрицы сигналов [3]:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H. \quad (3)$$

В этом случае формирование весовых коэффициентов в ДН АР производится на основе обращения матрицы ковариации [5]:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{v}(\mathbf{k}_s)}{\mathbf{v}(\mathbf{k}_s)^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{v}(\mathbf{k}_s)}. \quad (4)$$

Третий вариант управления ДН – антенный компенсатор (АК), в котором одна из антенн АР используется как опорная, остальные – вспомогательные, применяемые для подавления ( $N-1$ ) помех. Сигналы от вспомогательных антенн подвергаются перемножению с весовыми коэффициентами. В отличие от предыдущих вариантов, где каждый луч формирует свой собственный выходной сигнал, для антенного компенсатора выходной сигнал один, который

определяется как разность сигнала опорной антенны и суммы взвешенных сигналов вспомогательных антенн [6]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{w}^H \mathbf{X}_a, \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}_1$  – сигнал первой (опорной) антенны;  $\mathbf{X}_a = [\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_m]^H$  – сигналы от остальных антенных элементов.

Оптимальные значения весовых коэффициентов АК по критерию минимума среднеквадратичного значения рассчитываются [6]:

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{d}_{ra}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{R}_a^{-1}$  – обратная матрица ковариации сигналов вспомогательных антенн;  $\mathbf{d}_{ra}$  – вектор ковариации между сигналом с опорной и вспомогательными антеннами.

Четвертый вариант также является АК, но в каналах вспомогательных антенн реализуется пространственно-временная фильтрация (Space-time Adaptive Processing, STAP), основанная на использовании многоотводных фильтров [5].

Последним вариантом цифрового управления ДН является метод многосигнальной классификации (Multiple Signal Classification, MUSIC), который основан на разложении матрицы ковариации сигналов на собственные вектора и собственные значения [6]:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{E} \mathbf{\Lambda} \mathbf{E}^H, \quad (7)$$

где  $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \dots, \mathbf{e}_m]$  – матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $\mathbf{R}_{xx}$ ;  $\mathbf{\Lambda}$  – матрица, у которой на главной диагонали в убывающем порядке расположены собственные значения матрицы  $\mathbf{R}_{xx}$ .

В случае приема радиопомехи на основе собственных векторов ковариационной матрицы можно все сигнальное пространство можно разделить на подпространство помехи  $\mathbf{P}_n$  и подпространство смеси шума и навигационных сигналов  $\mathbf{P}_{cu}$  [6].

Подпространство шума и полезных сигналов  $\mathbf{P}_{cu}$  является ортогональным по отношению к подпространству помехи  $\mathbf{P}_n$ , поэтому умножение входных сигналов  $\mathbf{X}$  на  $\mathbf{P}_{cu}$  позволяет устранить присутствие помехи в выходном сигнале. Результирующие весовые коэффициенты, в которые дополнительно вводится формирование луча, рассчитываются по формуле [6]:

$$\mathbf{w} = \mathbf{v}(\mathbf{k}_s) \mathbf{P}_{cu}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{v}(\mathbf{k}_s)$  – вектор фаз сигналов в элементах АР при формировании луча в направлении, задаваемом волновым вектором  $\mathbf{k}_s$ .

На рис. 3 показаны примеры нескольких нормированных ДН, получаемых после расчета весовых коэффициентов для различных методов цифрового управления ДН. Прямые, пересекающие ДН под разными углами – направления приема спутниковых навигационных сигналов с указанием заданной литерной частоты ГЛОНАСС. Пунктирной линией обозначено направление приема гармонической помехи на частоте 1600 МГц мощностью – 60 дБм.

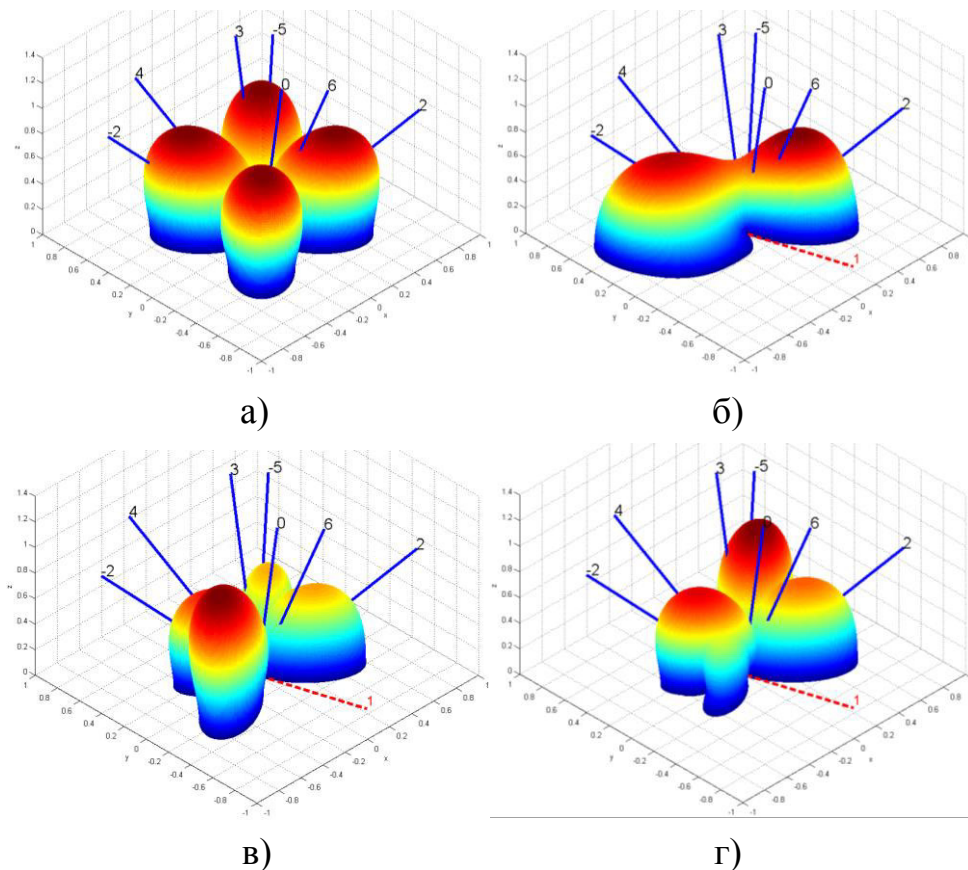


Рисунок 3 – Примеры построения ДН АР:

а – метод с линейными ограничениями, б – антенный компенсатор, в – метод минимума дисперсии шума, г – метод многосигнальной классификации

Полученные на этапе цифрового управления ДН АР при помощи одного из вышеприведенных способов выходные сигналы далее передаются на следующий этап, где реализуется первичная обработка навигационных сигналов: поиск по фазе дальномерного кода и доплеровскому смещению по частоте; демодуляция с использованием корреляторов и петель фазовой автоподстройки частоты и слежения за дальномерным кодом. Для реализации этих процедур за основу взято построение программного навигационного приемника, который используется для постобработки ранее оцифрованных навигационных сигналов GPS [7].

На рис. 4 приведены примеры поиска пика функции корреляции для различных комбинаций по сдвигу дальномерного кода и доплеровскому смещению. Первый график (рис. 4а) показывает корреляционный пик, обнаруживаемый в сигнале от одной из антенн в отсутствие помехи. Второй график (рис. 4б) показывает, что в случае присутствия помехи (гармоническая, – 80 дБм) правильно обнаружить корреляционный пик невозможно. Третий график (рис. 4в) – результат обработки выходного сигнала AP методом LCMV, при помощи которого в направлении приема навигационного сигнала сформирован луч. Здесь заметно, что использование пространственной обработки уменьшает влияние некоррелированного шума и максимизирует значение функции корреляции.

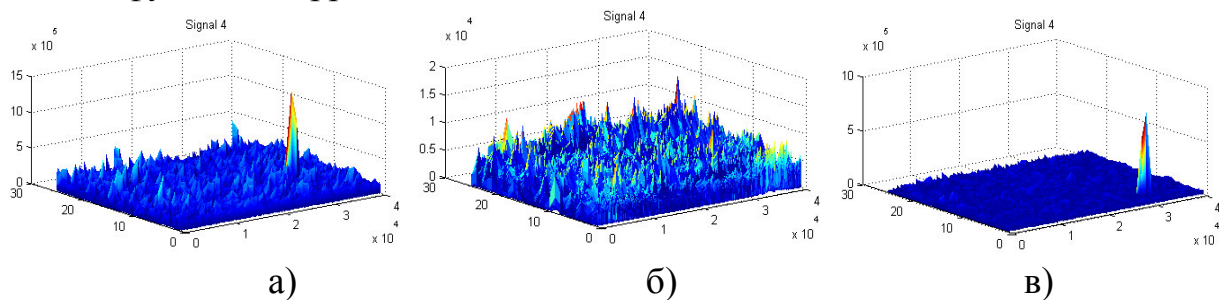


Рисунок 4 – Поиск корреляционного пика навигационного сигнала:

а – сигнал без помех; б – сигнал при воздействии гармонической помехи;

в – сигнал, когерентно усиленный в AP

Последним этапом в построенной модели выполняется численная оценка соотношения несущего сигнала к шуму [8], дБГц:

$$\frac{C}{N_0} = SNR + 10 \log_{10} \left( \frac{2 NBW}{f_s \tau} \right), \quad (9)$$

где  $NBW$  – ширина полосы шума, определяемая фильтром ПЧ;  $f_s$  – частота дискретизации;  $\tau$  – длительность интервала интегрирования;  $SNR$  – отношение сигнал/шум, определяемое выражением, дБ [8]:

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\overline{I_{ACC}^2}}{2 \overline{Q_{ACC}^2}} \right), \quad (10)$$

где  $I_{ACC}$  и  $Q_{ACC}$  – значения, накопленные в аккумуляторах в синфазной и квадратурной ветвях коррелятора в конце интервала интегрирования. Соответственно,  $\overline{I_{ACC}^2}$  и  $\overline{Q_{ACC}^2}$  получаются усреднением на некотором интервале времени возведенных в квадрат значений. Приведенные далее результаты получены при следующих значениях:  $NBW = 20$  МГц,  $f_s = 40$  МГц,  $\tau = 1$  мс, интервал усреднения – 200 значений.

В качестве примера на рис. 5 показаны зависимости  $C/N_0$  сигнала ГЛОНАСС с литерной частотой -5 при различных вариантах расчета модели АР. Воздействие помехи задавалось с направления  $\theta=70^\circ$  и  $\varphi=260^\circ$  (рис. 3).

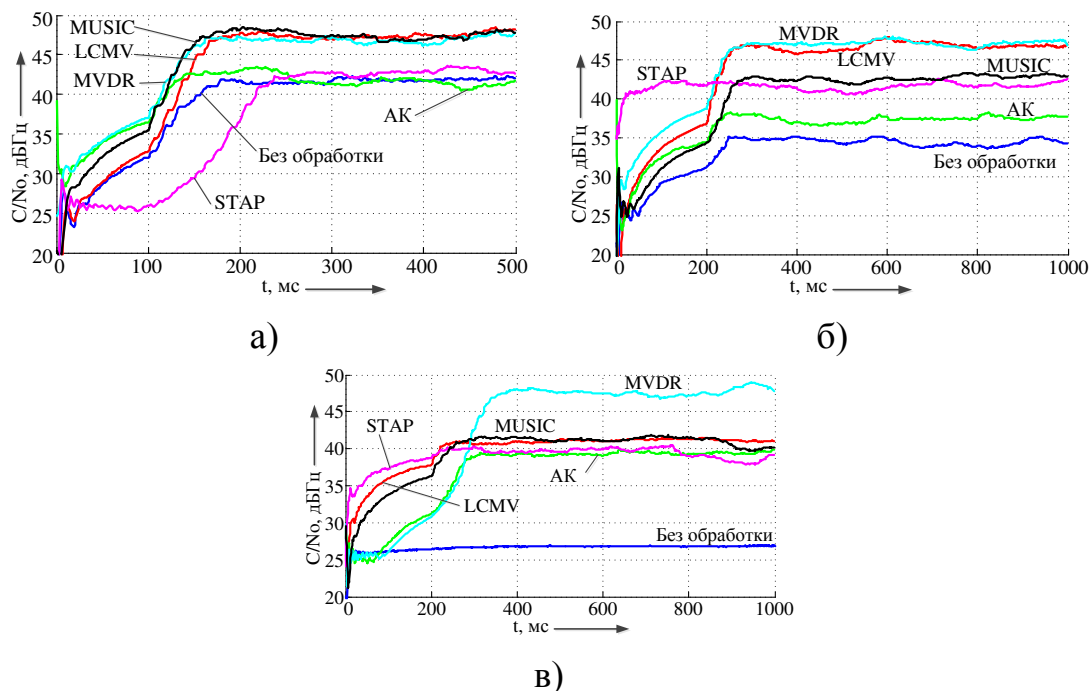


Рисунок 5 – Зависимости соотношения  $C/N_0$  сигнала ГЛОНАСС:

а – при отсутствии помех; б – при гармонической помехе -100 дБм;

в – при гармонической помехе -60 дБм

По рис. 5а можно сделать вывод, что при отсутствии помехи заметно, как за счет формирования луча в сторону приема навигационного сигнала методы LCMV, MVDR и MUSIC дают прирост соотношения сигнал/шум на 5-6 дБ по сравнению с использованием антенного компенсатора, многоотводных фильтров (STAP) или отслеживанием сигнала от одной антенны без обработки.

Введение гармонической помехи (рис. 5б) показывает, что соотношение  $C/N_0$  значительно проседает для сигнала без обработки. При превышении помехи над шумом на 40 дБ (рис. 5в) становится заметно, что для сигнала без обработки значение  $C/N_0$  меньше, чем требуется для выполнения слежения в навигационном приемнике. Метод MVDR показывает в данном случае наилучшие характеристики. Прочие методы дают уверенный прием сигнала на уровне 40 дБГц.

Предложенная комплексная модель позволяет эффективно оценивать работу АР для СРНС за счет объединения в себе этапов электродинамического расчета антенн, обработки радиосигналов, цифрового управления ДН, а также процедур первичной обработки навигационных сигналов, реализуемой в навигационных приемниках. Данный подход может применяться при разработке новых или анализе существующих образцов помехозащищённой НАП.

## Список литературы

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ: Учебник. / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – М.: Солон-Пресс, 2017. – 316 с., ил.
2. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Под. ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с., ил.
3. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с., ил.
4. Chang, C.-L., Analysis of performance and implementation complexity of array processing in anti-jamming GNSS receivers [Электронный ресурс] / C.-L. Chang. // Electrical and Electronic Engineering. – 2011. – № 1(2). – pp. 79 – 84. Режим доступа: semanticscholar.org (Дата обращения: 26.07.2019).
5. Marcos, E. P. STAP as a solution for hardware imperfections in multi-antenna GNSS receivers [Электронный ресурс] / E. P. Marcos, A. Konovaltsev, M. Cuntz, M. Meurer. – DLR, 2016. – Режим доступа: elib.dlr.de (Дата обращения: 26.07.2019).
6. Zheng, Y. Adaptive Antenna Array Processing for GPS Receivers. Master of Engineering Science Thesis [Электронный ресурс] / Y. Zheng. // The University of Adelaide, South Australia. – 2008. – 115 p. – Режим доступа: <https://digital.library.adelaide.edu.au> (Дата обращения: 26.07.2019).
7. Borre, K. A Software-Defined GPS and Galileo Receiver / K. Borre, D. M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S. H. Jensen – Boston: Birkhauser, 2007. – 176 p.
8. Badke, B. What is  $C/N_0$  and how it is calculated in a GNSS receiver? [Электронный ресурс] // Inside GNSS / B. Badke. – 2009. – Режим доступа: [insidegnss.com](http://insidegnss.com) (Дата обращения: 26.07.2019).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ряполов Артём Владимирович**  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ.  
Е.И. Забабахина»  
ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская  
обл., 456770, Российская Федерация.  
К.т.н., инженер  
E-mail: a.v.ryapolov@gmail.com

**Гредяев Дмитрий Александрович**  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ.  
Е.И. Забабахина»  
ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская  
обл., 456770, Российская Федерация.  
Инженер  
E-mail: dimbig174@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ryapolov Artyom Vladimirovich**  
FSUE «RFNC – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics».  
Vasiliev st., 13, Snezhinsk, 456770,  
the Russian Federation.  
Candidate of technical sciences, Engineer  
E-mail: a.v.ryapolov@gmail.com

**Gredyaev Dmitry Aleksandrovich**  
FSUE «RFNC – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics»,  
Vasiliev st., 13, Snezhinsk, 456770,  
the Russian Federation.  
Engineer  
E-mail: dimbig174@mail.ru

**Фамбулов Николай Вячеславович**  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ.  
Е.И. Забабахина»  
ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская  
обл., 456770, Российская Федерация.  
Инженер  
E-mail: fambulov@mail.ru

**Fambulov Nikolay Vyacheslavovich**  
FSUE «RFNC – Zababakhin All-Russia  
Research Institute of Technical Physics»,  
Vasiliev st., 13, Snezhinsk, 456770,  
the Russian Federation.  
Engineer  
E-mail: fambulov@mail.ru

УДК 654.02

**М. Е. Сапсаева**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТНОЙ КОММУТАЦИИ НА СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

***Аннотация.** Статья посвящена внедрению на железнодорожный транспорт сети с коммутацией пакетов. В работе рассматривается сеть с коммутацией пакетов. Рассмотрены сети 5G и их внедрение на железнодорожный транспорт, а так же увеличение скорости передачи с помощью виртуальных каналов.*

***Ключевые слова:** Коммутация пакетов, виртуальные каналы, сеть передачи данных, железная дорога.*

**Mariya E. Sapsaeva**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **APPLICATION OF PACKAGE SWITCHING ON NETWORKS OF RAILWAY TRANSPORT**

***Abstract.** Article is devoted to implementation on railway transport of a packet switched network. In work application of package switching in a data transmission network on railway transport is considered. Implementation of networks 5G and increase in transmission rate by means of virtual channels are discussed.*

***Keywords:** Packet switching, virtual channels, data transmission network, railroad.*

Сеть передачи данных (СПД) представляет собой сеть маршрутизаторов TCP/IP, объединенных друг с другом и с абонентами при помощи каналов связи, гарантирующий коммутацию каналов, сообщений или пакетов (рис. 1.).

В качестве маршрутизаторов в магистральном сегменте СПД ОАО «РЖД» применяются маршрутизаторы фирмы Cisco серии 75xx; Cisco 7513 – центральный маршрутизатор СПД МПС; Cisco 7507 – маршрутизаторы в региональных узлах.

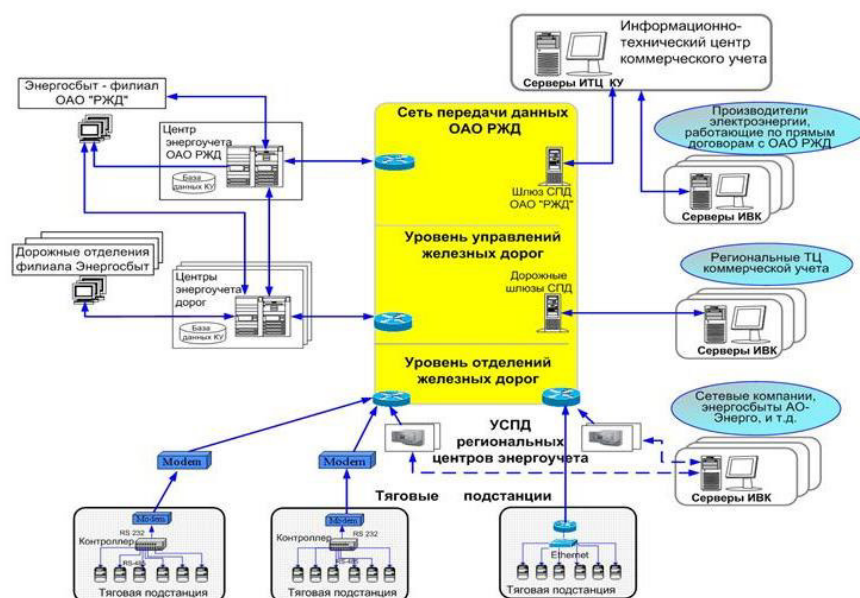


Рисунок 1 – Структура сети передачи данных

Оборудование транспортной подсистемы имеет резервный блок питания и поддержку технологии MPLS/VPN. Периферийный узел имеет возможность подключения от 2 до 4 каналов E1, производительность более 15000 пакетов в секунду и поддержку различных интерфейсов (Ethernet, Serial (sync/async), xDSL) для подключения конечных узлов [8].

Разработка автоматизированной системы оперативного управления грузовыми перевозками (АСОУП) и автоматизированной системы продажи билетов и учета мест в поездах, а также общего управления пассажирскими перевозками («Экспресс») привела к усовершенствованию сетей передачи данных на железнодорожном транспорте.

Система АСУЖТ – это комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом, целью которой является улучшение управления эксплуатационной работой железных дорог, контролирование, ведение учета, составление плана, управление деятельностью предприятий железнодорожного транспорта. [6]

АСОУП – это автоматизированная система управления перевозочным процессом, которая формирует и поддерживает в настоящем режиме времени информационную модель перевозочного процесса, прогнозирует и планирует эксплуатационные работы предприятий.

С целью планирования ввода поездов на станции, подготовки их к формированию, расформированию и отправлению поездов, для ведения информационной повагонной модели и организации информационно-справочного обслуживания персонала станции применяются

автоматизированные системы управления сортировочной станции, (АСУСС) грузовой станции (АСУГС) и контейнерного пункта (АСУКП).

АДЦУ – автоматизированный диспетчерский центр управления – предназначен для централизованного оперативного управления перевозочным процессом на сети железных дорог в целом (ЦУП) или на отдельном ее полигоне (ДЦУП); оснащен коллективными и индивидуальными средствами отображения текущего состояния перевозочного процесса [7].

Система автоматизированного рабочего места (АРМ) необходима для обеспечения АСУ достоверными данными о составе всех прибывающих на станцию и включает в себя информацию о результатах осмотра состава [6].

СПД грузовыми перевозками обеспечивают обмен сообщениями между абонентами. СПД грузовыми перевозками имеет структуру, состоящую из трех уровней: уровень линейных предприятий, дорожный (региональный) уровень, сетевой (межрегиональный) [1].

СПД линейных предприятий (СПД-ЛП) служит для автоматизированного и централизованного сбора, обработки, передачи и распределения по потребителям оперативных и диагностических данных в реальный момент времени. СПД-ЛП относится к классу распределенных сетей с коммутацией пакетов и использованием для передачи информации выделенных телефонных каналов связи и линий оптической и радиосвязи.

СПД дорожного уровня гарантируют взаимообмен данными между абонентами и системами обработки данных, решающими задачи управления перевозками и другими видами деятельности на железнодорожном транспорте.

Автоматизированная система управления перевозками требует непрерывного обмена данными и формирующей информационные потоки, которые должна передавать СПД дороги.

Скорость передачи информации в СПД дорожного уровня зависит от качества выделяемых телефонных каналов связи и типов используемых модемов. Телефонные каналы для передачи данных организуются из первичной сети с аналоговыми или цифровыми системами передачи.

СПД сетевого уровня обеспечивает реализацию межрегионального взаимообмена информацией между ГВЦ МПС и ИВЦ железных дорог и между ИВЦ соседних дорог. Сеть построена на основе выделенных телефонных каналов связи.

В СПД сетевого (межрегионального) уровня происходит обмен информацией между ИВЦ соседних дорог. По выделенным телефонным каналам передаются сведения о составе поездов, переходящих с одного пути на другой. Взаимообмен

данными между ГВЦ и ИВЦ дорог происходит по каналам связи 2 видов: каналы с протоколами BSC (BSC-каналы) и IP (IP-каналы).

СПД системы «Экспресс-2» обеспечивает взаимообмен данными между терминалами пунктов продажи билетов и вычислительным комплексом системы «Экспресс-2» в системе «запрос-ответ».

СПД межрегионального уровня обеспечивается набором программ «NETWORK», которые реализуют в региональных вычислительных комплексах функции узлов коммутации сообщений с использованием адаптивных методов маршрутизации для выбора наиболее оптимальных путей передачи сообщений по сети с учетом состояния ее узлов и каналов связи [2].

Узел SI3000 MSAN гарантирует реализацию мультимедийных услуг, услуг передачи данных с применением разных интерфейсов пользователя. SI3000 MSAN может работать как с традиционными системами ТФОП, так и с IP-сетями, ориентированными на NGN/IMS. SI3000 основан полностью на базе IP, оборудован пользовательскими интерфейсами и протоколами TDM, функциями шлюза на стороне сети (E1, IP), гарантирует подключение существующих абонентов ТФОП. Узел доступа с абонентскими аналоговыми (POTS) портами и сетевыми портами IP дает возможность устранения разрывов между сетями с коммутацией каналов и коммутацией пакетов [9].

Коммутация пакетов наиболее надёжный способ организации связи в условиях переменного трафика. Каждая станция передаёт данные пакетами, которые включают определенное количество данных пользователя и управляющую информацию, нужную для правильной работы сети (рис. 2.).



Рисунок 2 – Структура пакетной коммутации

Пакеты транспортируются по сети как самостоятельные информационные блоки. Коммутаторы сети получают пакеты от конечных узлов и на основании

адресной информации передают их друг другу, затем узлу назначения. В теории пакеты никогда не сбиваются с пути и путешествуют по кратчайшему маршруту в обход заторов и обрывов [5].

Виртуальные каналы создаются для передачи потоков пакетов через сеть. При этом должно быть наличие для всех его пакетов единых точек входа и выхода из сети (рис. 3.).

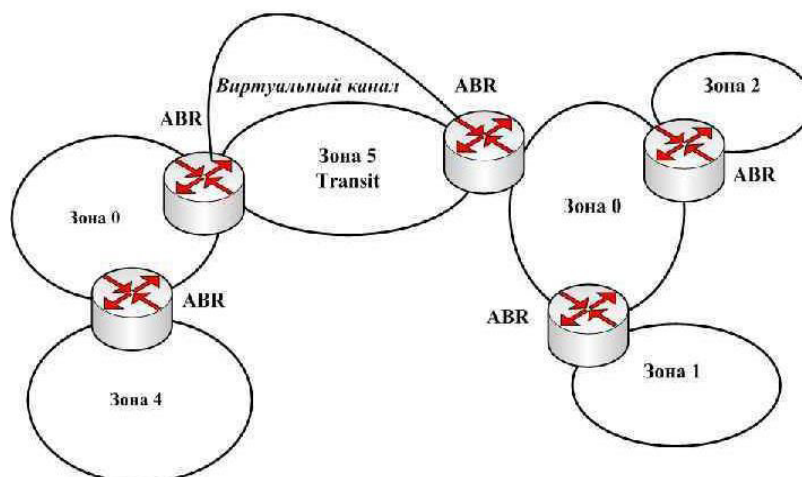


Рисунок 3 – Сеть виртуальных каналов

В случае если используются виртуальные каналы, путь соединения между двумя конечными точками установлен предварительно, и все пакеты для данного виртуального канала следуют согласно тому же маршруту. Недостатком виртуальных каналов считается их незащищенность в случае выхода из строя или временного выключения маршрутизатора [5].

В данный момент у железнодорожной отрасли есть попытки внедрения стандарта GSM-R – железнодорожная глобальная система подвижной связи, обеспечивающая передачу пакетных данных GPRS. Внедрение системы GPRS даст возможность операторам оказывать дополнительные услуги абонентам по подключению к ISP (поставщикам услуг Интернет) и работать по сетям PDN [4].

Преемником GSM-R может стать сеть 4G/LTE-R, который основан на сетевых технологиях GSM и UMTS, но работает полностью в области пакетной коммутации, пользуясь новыми протоколами сигнализации SIP и LTE-R. Так же в Российской Федерации решается вопрос о выделении частот для сети 5G, которые предполагают использование новых полос спектра. Возникнет необходимость расширения радиочастотного диапазона. Но радиочастотный спектр является ограниченным ресурсом, на который претендует множество пользователей. Железным дорогам потребуется разделить спектр радиочастот с другими пользователями из-за чего, возникнут проблемы надёжности связи [3].

## Список литературы

1. Неволин Д. Г. Сети и системы передачи данных на железнодорожном транспорте: Учеб. пособие / Д. Г. Неволин. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – 187 с.
2. Байбакова, Э. А. Информационные технологии в профессиональной деятельности: Учеб. пособие для студентов / Э. А. Байбакова. – Волгоград: ВТЖТ – филиал РГУПС, 2017. – 57 с.
3. FlexLink: Packet routing for 5G [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ninetiles.com/Routing\\_for\\_5g.html](http://www.ninetiles.com/Routing_for_5g.html).
4. Проект МСЖД EIRENE. Функциональные требования к системе стандарта GSM-R, версия 7, 2006.
5. Raisecom: Коммутация каналов и коммутация пакетов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.raisecom.ru/articles/45890>.
6. Сидорова, Е. Н. Автоматизированные системы управления в железнодорожном транспорте / Е. Н. Сидорова. – М.: Маршрут, 2005.
7. Система автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах / В. А. Гапанович, А. А. Грачев [и др.]; Под ред. В. И. Ковалева. – М.: Маршрут, 2006.
8. Крук, Б. И. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах / Б. И. Крук, В. Н. Попантопуло, В. П. Шувалов; Под ред. Профессора В. П. Шувалова. – Изд. 4-е, испр. и доп.– М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 620 с.: ил.
9. Куров, М. Б. Использование АТС «SI-3000» в сети железнодорожной связи [Текст] / М. Б. Куров, Н. И. Харламова, Н. А. Кравцова // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 2 (50). – С.74 – 76.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Сапсаева Мария Евгеньевна**  
Омский государственный университет путей  
сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: sapsayeva98@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Mariya Evgenevna Sapsaeva**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: sapsayeva98@mail.ru

**Р. А. Платковский, З. Е. Скуратов**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

***Аннотация.** Как известно, прогресс не стоит на месте. В настоящее время беспроводным сенсорным сетям уделяется особое внимание, что проявляется на стремительном росте соответствующих технологий. Стоит отметить, что все технологии беспроводных сенсорных сетей довольно сильно отличаются друг от друга. Рассмотрены основные направления развития, выделены основные отличия, преимущества, недостатки беспроводных сенсорных сетей ZigBee и LoRaWAN. Исходя из основных характеристик данных сетей, были определены их основные области применения.*

***Ключевые слова:** Беспроводная сенсорная сеть, ZigBee, LoRaWAN, шлюз, маршрутизатор, датчики, архитектура, координатор, передача данных*

**Roman A. Platkovskiy, Zakhar E. Skuratov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **FEATURES OF CONSTRUCTION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IN RAILWAY TRANSPORT**

***Abstract.** As you know, progress does not stand still. Currently, wireless sensor networks are given special attention, which is reflected in the rapid growth of relevant technologies. It should be noted that all technologies of wireless sensor networks are quite different from each other. The main directions of development are considered, the main differences, advantages, disadvantages of wireless sensor networks ZigBee and LoRaWAN are highlighted. Based on the main characteristics of these networks, their main applications were identified.*

***Keywords:** Wireless sensor network, ZigBee, LoRaWAN, gateway, router, sensors, architecture, coordinator, data transmission*

История развития беспроводных сенсорных сетей берет свое начало в 1950 – х годах с развертыванием сети SOSUS (Sound Surveillance System) в США. Изначально эти сети использовались военными для обнаружения и отслеживания советских подводных лодок. Но любой прогресс не стоит на месте, именно поэтому в настоящее время беспроводные сети активно применяются в различных отраслях [1].

Беспроводная сенсорная сеть – это сеть, которая обладает свойством самоорганизации и использующая датчики для мониторинга различных процессов.

Есть ряд особенностей, которыми обладают современные беспроводные сети:

- а) гибкостью архитектуры;
- б) высокая скорость проектирования и развертывания;
- в) высокой степенью защиты от несанкционированного доступа;
- г) отсутствием использования медного или волоконно-оптического кабеля;
- д) высокое качество обслуживания связи;
- е) технологической простотой доступа посредством использования специализированных информационных устройств (приборов, терминалов);
- ж) функционированием на основе достижения широкого международного соглашения по общим принципам управления доступа к ресурсам, основанного на взаимосвязи коммуникационных сетей, компьютерного оборудования и информационных терминалов [2].

С вышеперечисленными особенностями и связан стремительным рост темпов развития БСС. Современные технологии Wi-Fi, WiMax, Bluetooth, ZigBee, DECT привлекают новыми подходами к реализации разнообразных проектов по развитию беспроводной связи.

Исходя из технологий и передающих сред, можно классифицировать беспроводные сети следующим образом:

- а) сеть на радиомодеме;
- б) сеть на сотовом модеме;
- в) инфракрасные системы;
- г) система VSAT;
- д) система с использованием низкоорбитальных спутников;
- е) система с технологией SST;
- ж) радиорелейные системы;
- з) системы лазерной связи [3].

В данной статье рассматриваются особенности и достоинства спецификаций ZigBee и LoRaWAN.

ZigBee – спецификация сетевых протоколов уровня приложений APS и сетевого уровня NWK, которые используют сервисы нижних уровней – уровня управления доступом к среде MAC и физического уровня PHY, регламентированных стандартом IEEE 802.15.4. Представляет собой самоорганизующуюся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, которые объединены между собой посредством радиоканала.

Спецификация ZigBee ориентирована исключительно на приложения, которые нуждаются в безопасной передаче данных при относительно небольших скоростях, малом радиусе действия, а также возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания (батарей).

Физический уровень предоставляет услуги передачи данных, также, как и интерфейс организации управления физическим слоем и обеспечивает базу данных информации соответствующей персональной сети. Таким образом, физический уровень управляет трансиверной радиостанцией и выполняет выбор каналов и энергии и сигнальные функции управления. Он функционирует в одной из трёх возможных нелицензируемых радиочастотных полосах:

а) 868.0 – 868.6 МГц: Европа, разрешается один канал связи (2003, 2006);

б) 902 – 928 МГц: Северная Америка свыше десяти каналов (2003), расширено до тридцати (2006);

в) 2400 – 2483,5 МГц: используется во всём мире свыше шестнадцати каналов (2003, 2006) [4].

Сети ZigBee представляют собой совокупность базовых станций трех основных типов: координаторов, маршрутизаторов и конечных устройств.

Основная отличительная особенность технологии ZigBee заключается в том, что она при незначительном энергопотреблении поддерживает не только простые топологии сети («точка-точка», «дерево» и «звезда»), но и самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся ячеистую (mesh) топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений (рис. 1.)

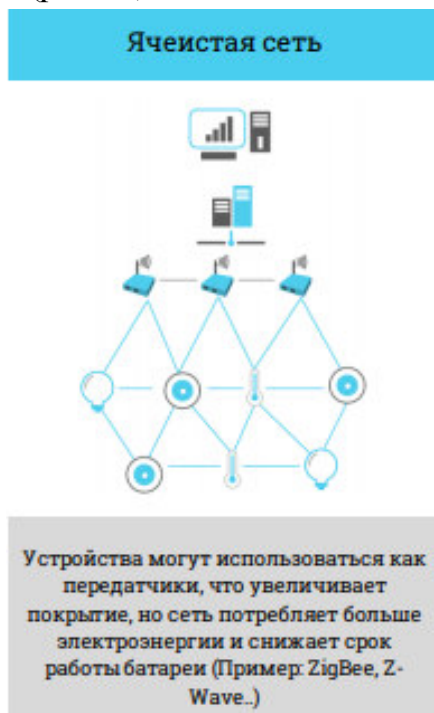


Рисунок 1 – Пример топологии сети

Технология ZigBee имеет широкий спектр применения в различных областях. Особенно эффективно применяется в беспроводных сенсорных сетях, автоматизации жилья, медицинском оборудовании, системах промышленного мониторинга и управления, а также бытовой электроники и «периферии» персональных компьютеров.

ZigBee предъявляются следующие требования:

- а) 16 частотных каналов в диапазоне 2400 – 2483,5 МГц;
- б) полоса частот канала 5 МГц;
- в) максимальная скорость 250 кбит/с;
- г) тип модуляции O-QPSK;
- д) номинальная выходная мощность 0 дБм (1 мВт),
- е) чувствительность приемника – 85 дБм;
- ж) дальность действия 10 – 100 м;
- з) размер стека 4– 32 кбайт;
- и) срок службы батареи 100 – 1000 дней;
- й) число узлов сети 65536 (16-разрядные адреса) [5].

Другой беспроводной технологией, которая будет рассмотрена, является LoRaWAN.

Типовая архитектура сети включает в себя оконечные узлы, базовую станцию (шлюз), сетевой сервер и сервер приложений. Базовая станция является своего рода прозрачным мостом для обмена зашифрованными сообщениями между оконечными узлами, которые выполняют функцию измерения и управления, и центральным сервером. Связь организуется с помощью традиционных технологий (Ethernet, Wi-Fi, 4G/LTE) по протоколу TCP/IP. Центральный сервер отправляет данные на сервер приложений и осуществляет мониторинг параметров всей сети: скорость, мощность передатчика, порядок и периодичность связи.

LoRaWAN сети передают данные на низких скоростях от 300 бит/с до 5 Кбит/с (при использовании полосы частотного спектра – 125кГц и модуляции LoRa).

В технологии LoRaWAN используется линейная частотная модуляция. Частота может изменяться как в сторону повышения, так и в сторону уменьшения. Традиционные значения ширины канала – 125, 250, 500 кГц. Современные модемы LoRa поддерживают и более узкие полосы, вплоть до 7,8 кГц.

Технология LoRaWAN обладает рядом преимуществ:

- а) большая дальность передачи радиосигнала достигает 10 – 15 км;
- б) минимальные затраты энергии на передачу небольшого пакета данных определяет низкое энергопотребление у конечных устройств;
- в) высокая масштабируемость сети на больших территориях;
- г) нет нужды в получении частотного разрешения и платы за радиочастотный спектр, вследствие использования нелицензируемых частот.

Также к преимуществам можно отнести высокую чувствительность приемника радиосигнала (рис. 2.)



Рисунок 2 – Сравнение чувствительности приемника радиосигнала

Недостатки технологии LoRaWAN:

- низкие показатели пропускной способности, что является следствием использования низкой частоты радиоканала.
- задержка передачи данных от датчика до конечного приложения может достигать от нескольких секунд до нескольких десятков секунд.
- нет единого стандарта.

Принципиальная схема построения сети LoRaWAN (рис. 3.)



Рисунок 3 – Принципиальная схема построения сети LoRaWAN

Данные в LoRaWAN сети могут передаваться в обе стороны, как от конечных точек к серверу, так и в обратном направлении. Точки передают данные не постоянно, а включают передачу лишь момент времени (как правило на 1 – 5 секунд), по окончании которого открывается два временных окна для приема данных. Остальное время трансиверы конечных узлов находятся либо в

неактивном состоянии, либо в состоянии приема, которое определяется классом устройства. Особенности различных классов устройств приведены в табл. 1.

Таблица 1

Особенности различных классов устройств

Класс	Особенности
А	Данный класс конечных узлов отличается своей экономичностью в потреблении энергии, а также применимостью на практике.
В	Для данного класса характерна относительно низкая временная задержка в обмене данными и более широкое временное окно приема.
С	Этот класс устройств потребляет наибольшее количество энергии, чем классы А и В, поэтому обычно не использует батарейное питание, но получает данные от сервера.

Шлюзы LoRa предназначены для использования в радиальных звездообразных сетевых архитектурах большого радиуса действия в системе LoRaWAN. Из-за свойств технологии LoRa эти шлюзы могут представлять собой многоканальные мультимодемные трансиверы, которые способны выполнять демодуляцию сразу нескольких каналов одновременно, и даже одновременную демодуляцию множества сигналов на одном и том же канале.

Узлы LoRaWAN сети могут находиться в зоне покрытия как одного шлюза, так и нескольких. Шлюзом в сетях с высокой плотностью абонентских устройств являются специальные многоканальные концентраторы, которые имеют возможность приема данных от нескольких узлов одновременно.

Центральный сервер LoRaWAN сети решает вопрос о необходимости изменения скорости передачи данных точками, мощности передатчика, а также выборе канала передачи, ее начале и продолжительности по времени, контролирует заряд батарей конечных узлов.

Каждый LoRaWAN пакет данных, отправляемых конечным узлом, в своем составе уникальный идентификатор приложения AppEUI, который принадлежит приложению на сервере сервис-провайдера, для которого он предназначен и этот идентификатор используется центральным сервером LoRaWAN сети для дальнейшей маршрутизации пакета и его обработки приложением на сервере (App Server) сервис-провайдера [6].

Одним из самых главных достоинств LoRaWAN является способность радиосигнала субгигагерцового диапазона обеспечивать стабильную связь там, где другие беспроводные сенсорные сети оказываются бессильны.

Модем LoRa на совмещенном GMSK канале имеет возможность подавления

помех до 19,5 дБ (за счет Гауссовой фильтрации), он может принимать и демодулировать сигналы на 19,5 дБ ниже уровня помех или шумов.

Помехоустойчивость позволяет использовать простую и недорогую систему с LoRa в местах, в которых имеется тяжелая спектральная обстановка, то есть, как в любом крупном городе или в гибридных сетях связи. В данных случаях использование технологии LoRa позволяет увеличить диапазон покрытия сети связи.

Также к важным особенностям можно отнести следующее:

- а) модем самостоятельно опрашивает датчик;
- б) использует беспроводную связь к одной или нескольким БС;
- в) данные от датчика передаются за короткий интервал времени, который задается пользователем;
- г) большую часть времени находится в режиме сна.

На железнодорожном транспорте беспроводные сенсорные сети активно внедряются и эффективно используются. В компании ОАО «РЖД» проводились испытания радиотехнологии LoRaWAN на грузовом поезде длиной в 91 вагон. Целью данного испытания являлось определение функциональных возможностей и параметров работы радиосети с использованием беспроводных устройств LoRaWAN на железнодорожном транспорте. Шлюз LoRaWAN и локальный сервер были установлены в прицепленном к локомотиву вагоне тягово-энергетической лаборатории (ТЭЛ) и подключены к источнику питания 220В. Антенна шлюза была закреплена сзади вагона. Для испытаний также были подготовлены 19 конечных устройств, настроенных на отправку 9 байтовых сообщений с номером отправляемого пакета для оценки потерь при передаче.

Задачи проведения данного испытания были таковы: необходимо было изучить возможности беспроводных датчиков в лабораторном поезде для измерений продольно-динамических нагрузок на автосцепке и/или на тензометрической колесной паре. Испытания проводились в режиме пониженной нагрузки и в режиме повышенной нагрузки на радиосеть при установке 5 и 10 радиомодулей LoRaWAN.

В связи с такой постановкой задачи датчики ставились в наиболее труднодоступные места, а именно в район колесных пар под вагоном. При применении в реальных условиях такие места использовать нежелательно, поскольку они со всех сторон окружены большой массой металла, к тому же антенна находится низко, что отрицательно сказывается на качестве связи. Но для испытаний такие условия были выбраны специально, чтобы убедиться в работоспособности технологии в крайне трудных внешних условиях. На (рис.4.) представлена установка радиомодуля LoRa на раме вагона.

Все датчики использовали только 3 рабочих канала с шириной 125 кГц и проверялось число потерянных пакетов в зависимости от заданных условий.

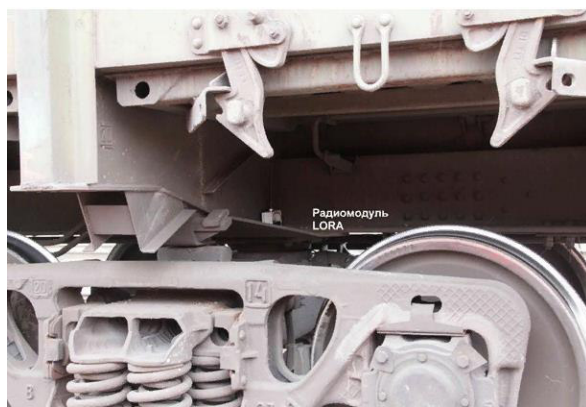


Рисунок 4 – Радиомодуль LoRa на раме вагона

Результаты испытаний:

а) стабильная связь и устойчивый уровень сигнала на всех вагонах до последнего;

б) при штатной работе сети и регулярной отправке сообщений 1 раз каждые 5 секунд уровень потерь сообщений составляет от 2.5% на ближайших к радиоплнзую датчиках до 6% в конце состава. Типичное время регулярной отправки сообщений с датчиков LoRaWAN измеряется в минутах или даже часах. Отправка каждые 5 секунд осуществима только в условиях небольшого числа одновременно работающих датчиков с одним шлюзом (точное значение требует расчета в зависимости от условий работы). В реальных условиях используется от 8 частотных каналов на шлюз и больше, что увеличивает емкость сети;

в) при попытке выжать максимум по объему передачи данных (частота отправки сообщений примерно 4 раза в секунду с каждого датчика) уровень потерь существенно повышается и составляет от 30% на ближайших к радиоплнзую датчиках до 85% в конце состава из-за коллизий пакетов в воздухе. Технология не подходит для высокой скорости передачи данных;

г) вероятность успешной передачи пакета зависит от нагрузки на сеть (чем выше нагрузка, тем ниже вероятность);

д) вероятность передачи пакета зависит от расстояния до радиомодуля в пределах длины поезда (чем больше расстояние, тем ниже вероятность).

В результате проделанных опытов были сделаны следующие выводы:

а) технология LoRaWAN может применяться для информационных систем РЖД с небольшим трафиком;

б) технология LoRaWAN неприменима для передачи данных, регистрируемых чаще 1го раза в секунду, такие как продольно-динамические нагрузки на автосцепке и/или на тензометрической колесной паре измерительного комплекса в связи с высоким процентом потери пакетов и низкой частотой передачи информации.

## Список литературы

1. Беспроводная сенсорная сеть // Портал цифровых технологий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iot.ru/wiki/besprovodnaya-sensornaya-set>.
2. Сенсорные сети: новый этап развития беспроводных сенсорных систем // Информационно – коммуникационные технологии infoCOM.UZ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infocom.uz/2017/06/03/sensornye-seti-novuyj-etap-razvitiya-besprovodnoj-svyazi/>.
3. Классификация беспроводных сетей // Студенческая библиотека Studbooks.net. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studbooks.net/2358128/tehnika/klassifikatsiya\\_besprovodnyh\\_setey](https://studbooks.net/2358128/tehnika/klassifikatsiya_besprovodnyh_setey).
4. Исследование сети передачи информации на основе стека протоколов ZigBee // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://knowledge.allbest.ru/programming/2c0a65635a2ac68a4c53a88421206c36\\_0.html](https://knowledge.allbest.ru/programming/2c0a65635a2ac68a4c53a88421206c36_0.html).
5. Особенности проектирования беспроводных ZigBee-сетей // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://wirelesse.ru/assets/files/pdf/2010\\_02\\_20.pdf](https://wirelesse.ru/assets/files/pdf/2010_02_20.pdf).
6. Архитектура LoRaWAN сетей // Форум Lo – Ra [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lo-ra.ru/lorawan-networks/>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Платковский Роман Андреевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25б ОмГУПС.  
Тел.: +7 (904) 824-29-74.  
E-mail: roma.platkovskiy@mail.ru

### **Скуратов Захар Евгеньевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25б ОмГУПС.  
Тел.: +7 (962) 051-46-68.  
E-mail: zs2597@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Platkovskiy Roman Andreevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b OSTU.  
Phone: +7 (904) 824-29-74.  
E-mail: roma.platkovskiy@mail.ru

### **Skuratov Zakhar Evgenievich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b OSTU.  
Phone: +7 (962) 051-46-68.  
E-mail: zs2597@mail.ru

# Надежность функционирования и информационная безопасность транспортных и инфокоммуникационных систем

---

УДК 621.316

**Е. А. Альтман, А. В. Александров, Т. В. Васеева**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ БПФ

*Аннотация.* Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) применяют для выявления спектральных свойств сигнала. Другая задача БПФ это уменьшение вычислительных затрат при расчете корреляции, свертки или перемножении чисел. Современные библиотеки для вычисления БПФ можно разделить на две группы: решения от производителей аппаратного обеспечения или кроссплатформенные библиотеки. В статье рассмотрены вопросы по размещению данных в памяти и кэше: алгоритм с учетом параметров кэш-памяти, кэш-независимых алгоритмов.

*Ключевые слова:* информационные технологии, программирование, обработка сигналов, алгоритм, Быстрое Преобразование Фурье.

**Evgeniy A. Altman, Aleksandr V. Alexandrov, Tatiana V. Vaseeva**  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF PROGRAMS FOR PROCESSING RADIO-TECHNICAL SIGNALS ON THE EXAMPLE OF FFT

*Abstract.* The Fast Fourier Transform Algorithm (FFT) is used to identify the spectral properties of a signal. Another FFT objective is to reduce computational costs when calculating correlation, convolution, or multiplying numbers. Modern libraries for computing FFTs can be divided into two groups: solutions from hardware manufacturers or cross-platform libraries. The article discusses the issues of placing data in memory and cache: an algorithm based on cache parameters, cache-independent algorithms.

*Keywords:* information technology, programming, signal processing, algorithm, Fast Fourier transform.

Методы извлечения информации из сигналов, принимаемых радиотехническими системами, во многих случаях ограничены имеющимися вычислительными ресурсами. Развитие средств вычислительной техники не приводит к решению этой проблемы – увеличение скорости работы современных процессоров немедленно задействуется выходом новых стандартов радиосвязи с более высокой скоростью передачи.

Увеличение быстродействия вычислительных устройств в большинстве случаев достигается за счет усложнения архитектуры этих устройств. Это приводит к усложнению программирования эффективных реализаций алгоритмов обработки сигналов на этих устройствах. Кроме того, затрудняется реализация универсальных программ, работающих на устройствах с различными объемами памяти, кэша, числа вычислительных блоков и пропускной способностью шин памяти.

Современный подход в разработке программ и аппаратных реализаций алгоритмов обработки сигналов состоит в применении различных информационных технологий для генерации эффективных реализаций алгоритмов для конкретного аппаратного обеспечения, а также в создании самонастраиваемых программ, подбирающих наиболее эффективную реализацию алгоритма непосредственно при запуске на конкретном вычислительном устройстве.

В работе рассматриваются современные информационные технологии для получения эффективных реализаций алгоритмов обработки сигналов на примере одного из самых сложных и, вместе с тем, часто используемых алгоритмов – Быстрого Преобразования Фурье (БПФ).

Современные библиотеки для выполнения БПФ можно разделить на две группы. К первой группе относятся решения от производителей аппаратного обеспечения, которые рассчитаны на работу на определенных процессорах. Вторая группа – это кроссплатформенные библиотеки, как правило, написанные на языках C/C++ и содержащие оптимизации под популярные наборы команд.

В первой группе среди производителей универсальных процессоров можно выделить библиотеки от Intel и NVidia. Программы для процессоров цифровой обработки сигналов являются узкоспециализированными, поэтому нет смысла приводить их в нашем обзоре.

Фирма Intel разрабатывает две библиотеки: Intel Integrated Performance Primitives (Intel IPP) [1] и Intel Math Kernel Library (Intel MKL) [2]. Первая содержит реализацию небольшого числа алгоритмов, оптимизированных под конкретный процессор. Вторая включает в себя большой набор математических функций, оптимизированных под наборы команд. Если нет необходимости в других математических функциях, то предпочтительнее использовать более быструю реализацию БПФ в IPP.

Для вычислений на графических картах (GPU – graphics processing unit) фирмы NVidia разработана библиотека cuFFT [3]. Другие реализации FFT используют стандарт OpenCL (платформа для написания программ для вычисления на GPU), но, без оптимизации под GPU от NVidia, они не имеют возможностей конкурировать с cuFFT по быстродействию.

Выбор кроссплатформенных библиотек достаточно широк. Далее рассмотрим те из них, которые отличаются наиболее продвинутой архитектурой и наибольшим быстродействием.

Библиотека FFTW (Fastest Fourier Transform in the West – наиболее быстрое преобразование Фурье на западе) была разработана в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT) Маттео Фриго (Matteo Frigo) и Стивеном Джонсоном (Steven Johnson) и была описана ими в ряде работ [4 – 6]. В настоящий момент используется третья версия библиотеки, выпущенная в 2003 году.

Авторы выделяют следующие основные особенности, отличающие FFTW от других библиотек для вычисления БПФ:

- она написана на C и может использоваться на различных аппаратных архитектурах и операционных системах;
- для любых размеров БПФ используется алгоритм с оценкой сложности  $O(N \log_2 N)$  (т. е. реализован, в том числе, и алгоритм БПФ для простых чисел);
- реализованы преобразования произвольных размерностей;
- поддерживаются алгоритмы для вещественных входных данных, симметричных или ассиметричных входных данных (т. е. дискретное косинусное преобразование и дискретное синусное преобразование).

Ключевой особенностью внутренней реализации FFTW ее авторы выделяют использование так называемого планировщика (planner) – функции, запускаемой однократно перед выполнением преобразований для оптимизации вычислений для заданного размера и используемой аппаратной платформы.

Идея функций, выполняющих подготовку вычислений, не была оригинальна в момент появления FFTW, а в настоящий момент используется в большинстве библиотек, выполняющих БПФ. Однако планировщик в этой библиотеке отличается сложным и эффективным алгоритмом построения функции для выполнения преобразования.

Он создает функцию для выполнения БПФ решающую «проблему» (problem). Проблема представляет собой структуру данных, в которой хранится информация о размере преобразования и размещении данных. Для решения проблемы планировщик с помощью обобщения алгоритма Кули-Тьюки разбивает ее на проблемы меньшего размера. Разбиение выполняется до тех пор, пока не

получится проблема, для которой имеется заранее подготовленное решение.

Решения проблем малого размера представлены в FFTW в виде codelet'ов (русскоязычный вариант термина отсутствует). Codelet представляет собой небольшой фрагмент кода для решения некоторой части задачи. Для написания codelet'ов FFTW содержит специальный codelet генератор – программа, написанная на языке Caml Light.

Codelet генератор на входе получает математическое описание проблемы на специальном высокоуровневом языке программирования и генерирует низкоуровневый код для решения этой проблемы для заданной платформы. Codelet генератор обновляется с выходом новых версий библиотеки и в последних версиях имеется возможность генерирования кода с использованием современных наборов SIMD инструкций [7].

Преимущество подхода с генерированием кода заключается не только и не столько в значительной экономии времени на его ручное написание, но и в возможности построения алгоритмов с большим основанием. Так, в описании генератора для первой версии библиотеки приводится пример codelet'a для БПФ по основанию 64, который требует 928 сложений, 248 умножений и 156 дополнительных переменных. Такого результата сложно достичь при ручном кодировании за разумное время.

Пользователям библиотеки нет необходимости изучать язык для описания проблем. В последних версиях библиотеки содержится более 150 заранее сгенерированных codelet'a, которые охватывают почти все возможные проблемы, возникающие у пользователей.

Помимо создания высокоэффективного кода для вычислительных операций FFTW, планировщик библиотеки оптимизирует также число операций по перемещению данных в памяти. Обобщенный алгоритм Кули-Тьюки требует транспонирование матрицы выходных значений на каждом шаге рекурсивного разбиения на БПФ меньшего размера. Физическая перестановка данных в памяти отнимала бы значительное число тактов и сильно снижала быстроедействие функции БПФ.

Для работы с «нетранспонированными» данными codelet'ы в FFTW генерируются с учетом возможности работы с данными, расположенных в памяти с некоторым шагом (stride). Это позволяет передавать функциям, выполняющим «БПФ строк» столбец данных, не транспонируя его в строку.

Другим аспектом работы с памятью в FFTW является учет особенностей размещения данных, как в оперативной памяти, так и в кэше. При построении плана планировщик пытается учесть размер кэша процессора с тем, чтобы отдельные проблемы могли целиком в нем размещаться и тем самым

минимизировать число пересылок данных между кэшем и оперативной памятью.

Библиотека FFTW является свободно распространяемой и может быть получена с сайта [8] как в исходных кодах, так и в скомпилированном виде.

Проект SPIRAL [9] был создан группой ученых из университета Карнеги-Меллон (Carnegie Mellon University, CMU) и Швейцарской высшей технической школы Цюриха (ETH Zürich). К нему присоединились ученые и студенты других университетов, в настоящий момент список участников насчитывает несколько десятков имен.

SPIRAL является системой генерации программ. С одной стороны, она поддерживает генерацию различных алгоритмов цифровой обработки сигналов. С другой стороны, она умеет генерировать алгоритмы для различного размера входных данных и различных аппаратных платформ с применением векторизации (использование SIMD инструкций) [7] и распараллеливания (использование нескольких ядер или нескольких процессоров) [10]. Помимо генерации программ, система умеет генерировать и описание аппаратных реализаций алгоритмов на языке Verilog.

Авторы системы отмечают следующие отличительные черты проекта:

- SPIRAL охватывает большой класс линейных алгоритмов цифровой обработки сигналов, в который входит большое количество математически сложных алгоритмов;

- SPIRAL использует простой декларативный фреймворк для описания математической составляющей алгоритмов, что позволяет без изменений использовать это описание при изменении аппаратной и программируемой составляющих реализаций алгоритмов;

- SPIRAL может легко быть расширен в различных направлениях, включая добавление новых аппаратных платформ, использование других подходов к оптимизации или изменение критериев эффективности программ;

- SPIRAL использует методы машинного обучения для выбора лучшей реализации алгоритмов;

- проект SPIRAL показал, что для математически сложных алгоритмов код, сгенерированный автоматически, не уступает, а иногда и превосходит код, написанный вручную.

Структура проекта представлена в ряде публикаций [11 – 13].

Его внутренняя архитектура состоит из трех уровней:

- алгоритмов;

- реализации;

- оценки.

На уровне алгоритмов используется специальный язык программирования

SPL (signal processing language, язык обработки сигналов) [14]. Он позволяет описать алгоритмы обработки сигналов на близком к математическим формулам языке.

На алгоритмическом уровне система с помощью правил для трансформации формул и разбиения на преобразования меньших размеров оптимизирует задачу по заданным критериям на уровне формул. Оптимизированная SPL формула поступает на уровень реализации.

На уровне реализации работает специальный SPL компилятор. Этот компилятор состоит из двух блоков: преобразования SPL формулы в программный код и оптимизации программного кода.

Программный код представляет собой программу на языках C или Fortran. При его генерации из SPL формулы сразу выполняются некоторые оптимизационные действия, например, «раскручивание» циклов (замена цикла последовательностью команд для экономии на действиях с индексными переменными).

Оптимизация программного кода в SPIRAL работает аналогично оптимизации, выполняемой компиляторами языков высокого уровня: выделение общих подвыражений, переупорядочивание кода для увеличения локальности обращений к памяти и др. Для этих целей не используются компиляторы языков высокого уровня, поскольку они не рассчитаны на работу с автоматически сгенерированным кодом и не всегда удачно оптимизируют, например, «раскрученные» циклы.

На уровне оценки происходит компиляция нескольких вариантов решения задачи и выбор наиболее быстродействующего. Также на этом уровне происходит обучение алгоритмов верхних уровней системы. Система оценивает насколько удачно сработали те или иные методы алгоритмического уровня и уровня реализации. При этом используются как методы динамического программирования (на верхние уровни поступает сигнал о том, в каком направлении вести оптимизационную процедуру), так и машинного обучения (удачные методы оптимизации запоминаются для построения других алгоритмов).

Наиболее принципиальным отличием SPIRAL от FFTW является то, что в нем вся оптимизация выполняется на этапе создания функции, в то время как FFTW делает акцент на оптимизацию во время создания плана, т.е. на компьютере пользователя непосредственно перед началом вычислений. Это отличие дает SPIRAL такие преимущества, как быстрый старт вычислений и удобство использования.

Для выполнения БПФ с помощью SPIRAL достаточно вызвать соответствующую библиотечную функцию. Реализации БПФ на языке C в

различных режимах (с одинарной или двойной точностью, с использованием SIMD инструкции или без и др.) можно скачать с сайта проекта [9]

Сравнить быстродействие реализации SPIRAL и FFTW достаточно проблематично. На сайтах обоих проектов приводятся выигрышные для авторов сайта графики, показывающие лучшее быстродействие их библиотеки по сравнению с более старой версией конкурентов. Независимые исследования [15,16] также выдают противоречивую информацию.

Исходя из приведенного анализа современных реализаций БПФ можно сделать вывод, что для создания эффективных программ для обработки сигналов на современных процессорах необходимо использовать генераторы программ, которые рассчитывают оптимальную реализацию либо во время компиляции, либо динамически, при запуске программы.

#### Список литературы

1. Intel R Integrated Performance Primitives (Intel R IPP) & Their Applications. [Electronic resource]. – Access mode: <https://software.intel.com/en-us/ipp> (дата обращения 23.09.2019).

2. Intel R Math Kernel Library. [Electronic resource]. – Access mode: <https://software.intel.com/en-us/mkl> (дата обращения 23.09.2019).

3. cuFFT | NVIDIA Developer. [Electronic resource]. – Access mode: <https://developer.nvidia.com/cufft> (дата обращения 23.09.2019).

4. Frigo, M. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT / M. Frigo, S. G. Johnson // Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on. Т. 3. – IEEE, 1998. – pp. 1381 – 1384. – DOI: 10.1109/ICASSP.1998.681704.

5. Frigo, M. The design and implementation of FFTW3 / M. Frigo, S. G. Johnson // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Т. 93. – № 2. – pp. 216 – 231. – DOI: 10.1109/JPROC.2004.840301.

6. Johnson, S. G. Implementing FFTs in Practice / S. G. Johnson, M. Frigo // Fast Fourier Transforms / под ред. С. S. Burrus. – Rice University, Houston TX : Connexions, 09.2008. – Гл. 11. [Electronic resource]. – Access mode: <https://cnx.org/contents/ulXtQbN7@15/Implementing-FFTs-in-Practice>.

7. Efficient utilization of SIMD extensions / F. Franchetti, S. Kral, J. Lorenz, C. W. Ueberhuber // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Т. 93. – № 2. – pp. 409 – 425.

8. FFTW Home page. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.fftw.org/index.html> (дата обращения 23.09.2019).

9. Spiral Home page [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.spiral.net/> (дата обращения 23.09.2019).

10. Popovici, T. Large Bandwidth-Efficient FFTs on Multicore and MultiSocket Systems / T. Popovici, T.-M. Low, F. Franchetti // IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). – IEEE, 2018.

11. SPIRAL: Code generation for DSP transforms / M. Puschel [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Т. 93. – № 2. – pp. 232 – 275. – DOI: 10.1109/JPROC.2004.840306.

12. SPL: A Language and Compiler for DSP Algorithms / J. Xiong, J. Johnson, R. W. Johnson, D. Padua // Programming Languages Design and Implementation (PLDI). – 2001. – pp. 298 – 308.

13. Fast Fourier transform benchmark on X86 Xeon system for multimedia data processing / Y.-S. Park, K.-R. Park, J.-M. Kim, H.-Y. Jeong // Multimedia Tools and Applications. – 2017. – Т. 76. – № 4. – С. 6015 – 6030.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

### **Васеева Татьяна Валериевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: tvvaseeva@gmail.com

### **Альтман Евгений Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: AltmanEA@gmail.com

### **Александров Александр Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «АиСУ» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: alexandrov\_a\_v@mail.ru

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

### **Vaseeva Tatiana Valerievna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Graduate student of the department

«Automation and control systems» OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: tvvaseeva@gmail.com

### **Altman Evgeniy Anatolevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. m Omsk, 644046, the Russian

Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems» OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: AltmanEA@gmail.com

### **Aleksandrov Aleksandr Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644000,

the Russian Federation.

Postgraduate student at the Department of «Automation and control system» OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: alexandrov\_a\_v@mail.ru

**А. В. Шилер, Д. А. Войтенко, О. С. Бутов**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **БЛОКЧЕЙН: БЕЗОПАСНОСТЬ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА**

***Аннотация.** В данной статье выполнен анализ алгоритмов консенсуса технологии blockchain с точки зрения информационной безопасности, рассмотрены основные алгоритмы, такие как Proof-of-Work и Proof-of-State и существующие возможные атаки на них.*

***Ключевые слова:** блокчейн, децентрализация, атака, биткоин.*

**Alexander V. Shiler, Dmitry A. Voitenko, Oleg S. Butov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **BLOCKCHAIN: SECURITY OF CONSENSUS ALGORITHM**

***Abstract.** This article analyzes the algorithm of the blockchain technology consensus, from the information security point of view. Such algorithms as Proof-of-Work and Proof-of-State and existing attacks on them are considered.*

***Keywords:** blockchain, decentralization, attack, bitcoin.*

Блокчейн – это выстроенная по определённым правилам непрерывная последовательная цепочка блоков (связный список), содержащих информацию. То есть блокчейн – это способ хранения данных или цифровой реестр транзакций, сделок, контрактов (рис. 1).

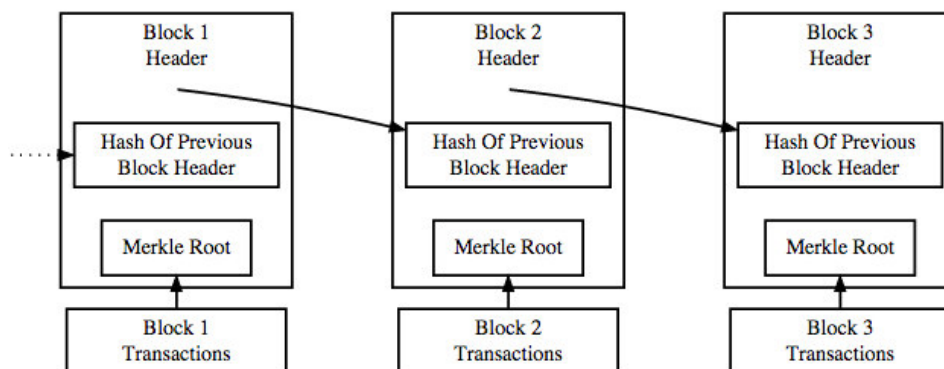


Рисунок 1 – Упрощенное представление цепи блокчейн

Блоки – связанные элементы цепи, которые состоят из заголовка и списка

транзакций. Каждый последующий блок связан с предыдущим при помощи хэша его заголовка. Заголовок представляет собой структуру, содержащую различную служебную информацию.

Вторая составляющая блока - транзакции, включенные в этот блок. В качестве транзакций можно также использовать любые блоки данных, что позволяет использовать блокчейн для различных целей.

Основные принципы технологии блокчейн:

1) Децентрализация – транзакции и блоки формируются непосредственно узлами сети, к тому же все блоки могут быть проверены любым узлом, что исключает возможность мошеннических действий. В блокчейне нет единого центрального узла, от функционирования которого зависит работа всей сети. Копия блокчейна хранится на множестве устройств, поэтому вмешательство в один из узлов не принесет результата.

2) Необратимость операций – из-за того, что каждый блок связан с предыдущим исключается возможность подмены или изменения блоков, так как любые внесенные правки тут же будут отражаться на хэш-значении самого блока и на всех последующих блоках, записанных после него.

Децентрализация блокчейна обеспечивается за счет его работы на основе одноранговых сетей (рис. 2). Информация о текущем состоянии цепочки загружается, синхронизируется и предоставляется многими компьютерами во всем мире.

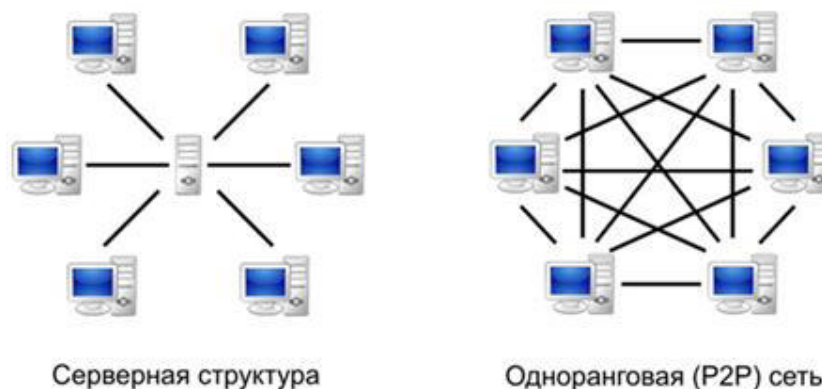


Рисунок 2 – Сравнение серверной топологии с одноранговой

Эти компьютеры называются «узлами» или «нодами», и они работают совместно в одноранговой сети. Каждый раз, когда добавляется новый блок, все узлы обновляют свою цепочку. Использование одноранговой сети имеет определенные преимущества:

- всегда можно проверить состояние блокчейна, используя программу-проводник (*blockchain explorer*);

- не надо полагаться только на одну сторону, чтобы знать истинное состояние блокчейна;

- злоумышленнику придется одновременно взломать все компьютеры сети, а не один сервер.

В технологии блокчейн используется понятие консенсуса. Консенсус – это процесс принятия решений группой, в котором все члены группы соглашаются поддержать решение в интересах целого. Голосование происходит в пользу большинства, не учитывая интересы меньшинства, но, с другой стороны, это гарантирует достижение соглашения, которое несет пользу всей группе. Другими словами, пользователям системы необходимо без центрального посредника сети достичь согласия на добавление новых данных в цепочку, с помощью предварительно заданных правил.

От каждого текущего блока в цепочке есть только один путь к родительскому блоку (*genesis block*). Однако если проследить от родительского блока и далее то можно обнаружить раздвоения цепи (форки).

Блоки одновременно создаёт множество «майнеров» – людей, занимающихся добычей криптовалюты. Регулярно возникают ситуации, когда один и тот же блок является предыдущим для двух новых блоков.

Каждая из ветвей равноправна до тех пор, пока одна из них не получит более длинное продолжение. Обычно, при равенстве длины предпочтение отдаётся той цепочке, конечный блок которой появился раньше. Система автоматически легитимной считает более длинную цепочку, не обращая внимание на время создания последнего блока. Транзакции, вошедшие исключительно в менее длинную ветку (в том числе по выплате вознаграждения), теряют статус подтверждённых.

Рассмотрим распространённые алгоритмы консенсуса в аспектах надёжности и безопасности.

### 1) Proof-of-Work

Изначально в качестве основного алгоритма консенсуса использовался механизм доказательства о проделанной работе (Proof-of-Work или PoW), в котором основной принцип заключается в подтверждении транзакций путем проведения достаточно сложной вычислительной работы, при этом результат этой работы должен быть легко и быстро проверяем.

Вычислительная работа заключается в том, чтобы найти действительное число *nonce*, удовлетворяющее условиям «сложности сети». Число *nonce* предоставляется другим участникам на проверку узлом, который его вычислил. Корректность результата проверяется при помощи всего одной операции хэширования.

Первый узел, который нашел это число получает вознаграждение от блокчейн сети. Все узлы соревнуются между собой (наращивая емкость вычислительных ресурсов), чтобы оказаться тем самым, первым узлом, получающим вознаграждение (рис. 3).

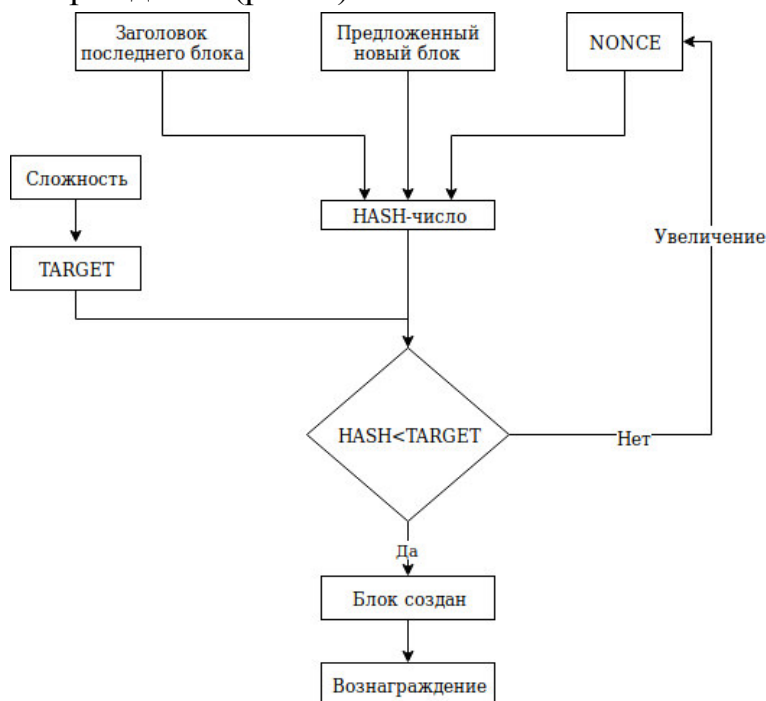


Рисунок 3 – Схема алгоритма Proof-of-Work

Особенность алгоритма заключается в том, что вероятность нахождения решения для нового блока прямо пропорционально мощности (хэшрейту) оборудования, используемого в майнинге.

Под хэшрейтом будем понимать количество вычисленных по определенному алгоритму хэшей в секунду. Для различных блокчейн-сетей алгоритмы расчета хэша разные, в связи с этим хэшрейт одного и того же оборудования для разных сетей будет различаться.

Уязвимости алгоритма:

- 1) атака Сивиллы;
- 2) возможность атаки 51% и двойной траты средств.

Атака Сивиллы заключается в том, что в момент подключения к сети пользователь не знает IP-адреса доверенных узлов и вынужден их запрашивать. Так как процесс соединения носит случайный характер возникает вероятность того, что такой запрос может попасть на узел злоумышленника, который в качестве доверенных узлов может выдать подконтрольные ему вредоносные узлы. Поэтому злоумышленник стремится наполнить сеть такими узлами, с целью увеличить вероятность соединения с ними легитимного пользователя.

Получается, что вероятность попасть на узел злоумышленника пропорциональна количеству подконтрольных ему узлов. И в случае успеха пользователь фактически получает искаженные недостоверные данные.

Проблема уязвимости усугубляется тем, что невозможно создать постоянный список доверенных узлов, так как это будет противоречить принципу децентрализации.

Последствия атаки Сивиллы:

- атакующий блокирует транзакции пользователя, фактически отсоединив его от общей сети;
- атакующий сам решает, к какому блоку подсоединить пользователя, и чаще всего это отдельно созданные им блоки, где реализуется «двойная трата»;
- атакующий отслеживает все транзакции пользователя, применяя для этого скрипты и программное обеспечение (ПО).

В качестве мер защиты от данных атак предлагаются следующие меры.

В силу отсутствия доверенного центра, в одноранговой сети есть 2 способа признать новый идентификатор: либо получить гарантии его добросовестности от других узлов, либо проверить его самостоятельно.

Проверку пользователя можно реализовать путем ввода некоторой задачи, которую один пользователь не может решить самостоятельно. При этом учитывается, что ресурсы узлов ограничены.

Если учитывать ограниченность вычислительных ресурсов, то пользователь может потребовать от каждого идентификатора решать уникальную, вычислительно сложную задачу за ограниченный период времени. Это позволит исключить узлы-пустышки, не обеспеченные вычислительными мощностями.

Еще одним решением данной проблемы может стать введение показателя степени доверия к узлу и числа успешно пройденных проверок. Чаян Банерджи предложил схему косвенной проверки узла, состоящей из двух стадий [1]. На первой стадии результат проверки – степень доверия проверяемому узлу – сообщают ближайшие узлы. Полученные значения сравниваются с результатами аналогичной проверки несколькими другими, случайно выбранными удалёнными узлами. В подавляющем большинстве случаев это позволяет обнаружить узлы-псевдонимы, принимавших участие в проверке на первом этапе.

Также существуют методы, предусматривающие плату за создание идентификатора.

Атака 51% заключается в том, что злоумышленник захватывает более половины хэшрейта всей сети и получает повышенные привилегии. За счет преимущества вычислительных мощностей появляется возможность отправить

средства на один адрес, и в то же время отправить те же деньги на другой адрес раздвоенной копии блокчейна (например, обратно на свой кошелек). Данный тип атаки позволяет провести «двойную трату» средств. После публикации скрытой ветки блокчейна, которая является более длинной чем публичная, все транзакции публичной ветви после разветвления считаются недействительными, а в то же время одни и те же средства будут использованы уже дважды.

Например, в биткоине атака 51% вполне реализуема, так как большая часть хэшрейта сосредоточена в руках Китайских майнинг пулов (более 65%). Объединившись, они могут осуществить данную атаку. Пул – это объединение мощности оборудования сразу многих майнеров для повышения вероятности нахождения блока. Награда за блок, добытый пулом, распределяется среди всех участников.

На момент написания статьи распределение хэшрейта по майнинг пулам биткоина выглядело следующим образом [2] (рис. 4). Огромная вычислительная мощность относительно централизована, а путем объединения пулов можно добиться еще большей централизации.

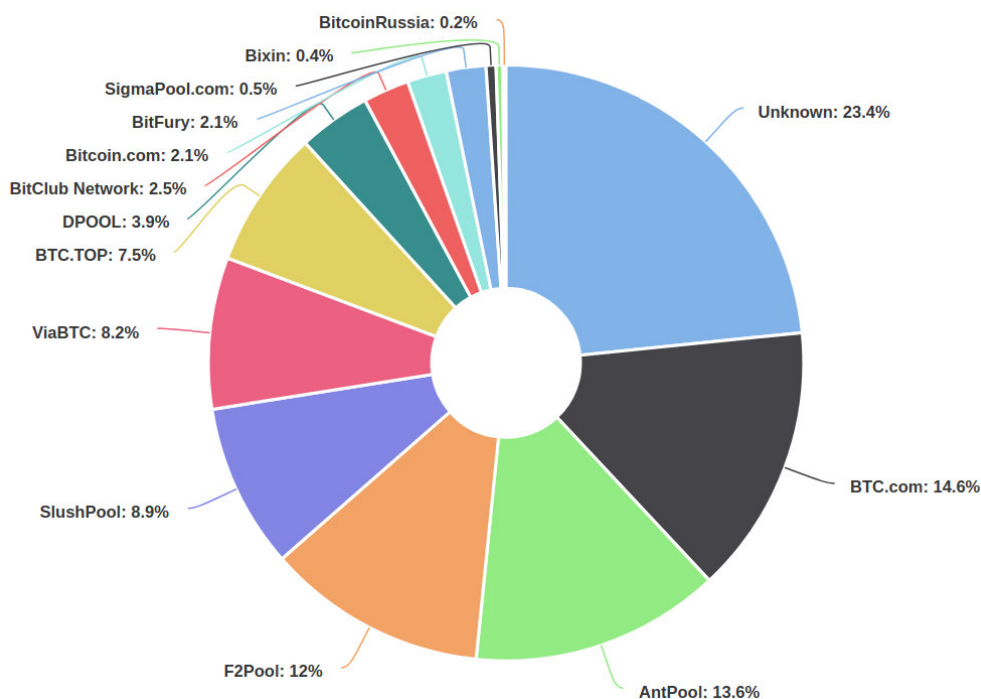


Рисунок 4 – Распределение хэшрейта биткоин пулов

Одним из вариантов защиты от данной атаки является схема, предложенная Horizen, которая предусматривает штрафы за задержку публикации блоков. И так как майнеры-злоумышленники должны держать

перед атакой блоки своей скрытой цепочки в секрете - при публикации этой цепочки они должны будут понести материальные потери [3].

## 2) *Proof-of-Stake (PoS)*

Суть данного подхода в том, что в отличие от алгоритма *PoW* здесь исключено чрезмерное расходование энергетических ресурсов. Подтверждение блоков здесь происходит путем произведения ставок в валюте сети (токенах) узлами сети на тот блок, который они считают верным. Размер и вероятность получения вознаграждения зависит от количества токенов, зарезервированных для подтверждения транзакций выбранного блока. Таким образом исключается неэффективное использование вычислительных мощностей и потребление ресурсов (рис. 5).

Преимущества алгоритма:

- невозможность классической «атаки 51%» (для полноценной атаки на сеть потребуются огромные объемы активов, что фактически делает ее нецелесообразной);
- отсутствие чрезмерного потребления ресурсов (по сравнению с *PoW*);
- более быстрая скорость подтверждения транзакций.

Уязвимости алгоритма:

- проблема *Long Range Attack*;
- проблема *Nothing-at-Stake*.

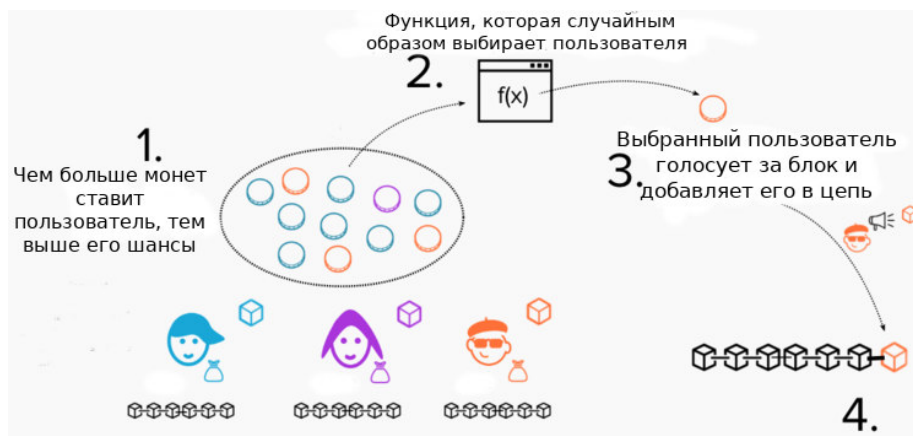


Рисунок 5 – Схема алгоритма PoS

Проблема *Long Range Attack* представляет собой механизм, идентичный атаке 51%. Но вместо того, чтобы начинать атаку, например, 6 блоков назад, необходимо вернуться гораздо дальше в историю цепи (например, на 60 000 блоков). Это проблема для *PoS*, поскольку нет доказательств работы (или эквивалентной трудоемкой операции), необходимой для перезаписи очень длинной цепочки.

Для противодействия этой проблеме был предложен запрет принятия ветвлений глубже чем на  $N$  блоков от последнего, где  $N$  – длина депозита пользователя. То есть злоумышленнику для проведения такой атаки будет необходимо иметь очень большое количество активов, размер которых будет увеличиваться с каждым новым легитимным блоком.

### 3) Nothing-at-Stake

Проблема *Nothing-at-Stake* заключается в том, что при использовании данного алгоритма держателям валюты выгодно поддерживать несколько веток блокчейна, так как от этого они не несут никаких потерь. Получается за счет этого затрудняется достижение консенсуса (рис. 6).



Рисунок 6 – Nothing-at-Stake

Для решения этой проблемы было предложено несколько модификаций алгоритма *proof-of-stake*, например *Casper FFG* от разработчиков *Ethereum* [4].

В *Casper FFG Nothing-at-Stake* пресекается путем наказания некорректно действующих узлов. Некорректным поведением в данном случае будет считаться поддержка более одной ветки.

В заключении следует сказать, что в сообществе блокчейн еще не пришли к оптимальному варианту консенсуса цепи, так как у каждого из подходов есть свои плюсы и минусы. Однако с развитием технологии появляется множество альтернативных способов поддержания консенсуса, которые позволяют либо исключить известные проблемы, либо свести к минимуму вероятность атак.

### Список литературы

1. Banerjee, Ch. Sybil node detection in peer-to-peer networks using indirect validation [Электронный ресурс] // IEEE Xplore. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7030375>, свободный (дата обращения: 10.09.19).

2. Распределение количества перебора хэшей [Электронный ресурс] // Blockchain. – Режим доступа: <https://www.blockchain.com/ru/pools>, свободный (дата обращения: 08.09.19).

3. Новый проект обещает программу защиты от кибератак 51% [Электронный ресурс] // Блокчейн и криптовалюты в России. – Режим доступа: <https://cryptorussia.ru/news/novyy-proekt-obeshchaet-programmu-zashchity-ot-kiberatak51> (дата обращения: 13.09.19).

4. Buterin, V. Casper the Friendly Finality Gadget [Электронный ресурс] / Vitalik Buterin, Virgil Griffith. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1710.09437>, свободный (дата обращения: 10.09.19).

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

### **Шилер Александр Валерьевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Информационная  
безопасность» ОмГУПС.  
Тел. +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

### **Войтенко Дмитрий Александрович**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент 5 курса ОмГУПС.  
Тел. +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

### **Бутов Олег Сергеевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент 5 курса ОмГУПС.  
Тел. +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

### **Shiler Alexander Valerevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
PhD, associate Professor, head of the  
Information security Department OSTU.  
Phone: +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

### **Voitenko Dmitry Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
5<sup>th</sup> year student OSTU.  
Phone: +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

### **Butov Oleg Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
5<sup>th</sup> year student OSTU.  
Phone: +7 913 969 90 99  
Email: shiler\_alex@inbox.ru

**Д. В. Беленков<sup>1</sup>, Е. Д. Бычков<sup>1</sup>, Ж. Т. Беленкова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация.

<sup>2</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## **АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОПЕРАЦИИ КОМПОЗИЦИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ НА ОСНОВЕ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ PYTHON**

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию возможностей реализации алгоритмов нечетких множеств на языке программирования Python. Данный язык программирования обладает легкостью в освоении, наличием большого количества математических библиотек, библиотек для реализации нейронных сетей, но нет ни одной библиотеки нечеткой логики. Основным результатом данной работы состоит в том что впервые была показана возможность использовать язык программирования Python для решения операции композиции нечетких множеств.*

***Ключевые слова:** нечеткие множества, матрицы, алгоритм, композиция, программирование.*

**Dmitry V. Belenkov<sup>1</sup>, Evgeniy D. Bychkov<sup>1</sup>, Zhanna T. Belenkova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation.

<sup>2</sup>Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, the Russian Federation

## **ALGORITHM FOR DECISION OPERATIONS COMPOSITION OF FUZZY SETS BASED ON PROGRAMMING LANGUAGE TOP LEVEL PYTHON**

***Abstract.** The work is devoted to the study of the possibilities of implementing fuzzy set algorithms in the Python programming language. This programming language has ease of development, the presence of a large number of mathematical libraries, libraries for implementing neural networks, but there is not a single library of fuzzy logic. The main result of this paper is that it was shown for the first time that we can use the Python programming language to solve the fuzzy set composition operation.*

***Keywords:** fuzzy sets, matrices, algorithm, composition, programming.*

### **1 Введение**

Постоянное увеличение сложности современных объектов исследования и их уникальность приводит к нарушению явного прослеживания причинно-следственных связей, что таким образом приводит исследователя к условиям неопределенности при выборе или построении математической модели из-за отсутствия полноты исходных данных. Поэтому исследователю приходится

обращаться к интуиции, эвристике и использовать информацию нечислового характера, например, «очень сильное взаимодействие», «малое значение коэффициента», «гораздо больше, чем», «примерно число  $v$ », «высокое качество канала связи», «низкий», и т.п., имеющую нечеткий смысл с точки зрения детерминированных и вероятностно-статистических методов моделирования объектов исследования. В таких случаях становится принципиально трудно построить адекватную модель объекта исследования на основе теорий традиционной математики, т.к. в ней нет объектов, с помощью которых можно точно отобразить нечеткость высказываний и представлений исследователя или эксперта.

## 2 Модель нечеткой композиции.

Пусть  $E$  – универсальное множество,  $x$  – элемент  $E$ . Нечеткое подмножество  $A$  универсального множества  $E$  определяется как множество упорядоченных пар  $A = \{ \mu_A(x)/x \}$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности (или просто функция принадлежности), принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве  $M$  (например,  $M = [0,1]$ ). Функция принадлежности указывает степень (или уровень) принадлежности элемента  $x$  подмножеству  $A$ . [1]

Если  $Q$  и  $V$  - два универсальных множества, то произведение  $Q \times V$  есть семейство упорядоченных пар  $(q,v)$ ,  $q \in Q$ ,  $v \in V$ . Бинарным отношением между  $Q$  и  $V$  называется нечеткое подмножество прямого произведения вида:

$$R = \int_{(q,v) \in Q \times V} \frac{\mu_R(q,v)}{(q,v)} \quad (1)$$

где  $Q \times V$  - дискретное множеств.

Символ  $\int$  использован для обозначения объединения элементов  $\mu_R(q,v) / (q,v)$ , здесь  $\mu_R: Q \times V \rightarrow [0,1]$ , функция двух переменных называется функцией принадлежности нечеткого отношения. Её интерпретация аналогична интерпретации функции принадлежности нечеткого множества [3]. Переменные  $q, v$  называются базовыми, а обычное нечеткое множество:

$$S_R = \{ (q,v) \in Q \times V : \mu(q,v) > 0 \} \quad (2)$$

называется носителем нечеткого отношения [4]. Задать бинарное  $R$  отношение  $R$  на  $Q \times V$  означает указать пары элементов  $(q,v) \in Q \times V$ , определенно относящихся к  $R$ , т.е. такие  $q, v$ , которые определенно связаны отношением  $R$ ; пары  $(q,v)$ , определенно не связанные отношением и, наконец пары  $(q,v)$ , имеющие промежуточные градации принадлежности к  $R$ .

Пусть на  $Q$  заданы два нечетких отношения  $R1$  и  $R2$ .

Объединение двух нечетких отношений  $R1 \cup R2$  определяется так:

$$\mu_{R1 \cup R2}(x,y) = \max(\mu_{R1}(x,y), \mu_{R2}(x,y)), x,y \in Q. \quad (3)$$

Пересечение двух нечетких отношений  $R1 \cap R2$  и определяется так:

$$\mu_{R1 \cap R2}(x,y) = \min(\mu_{R1}(x,y), \mu_{R2}(x,y)), x,y \in Q. \quad (4)$$

Дополнение нечеткого отношения  $R$  обозначается  $\bar{R}$  и определяется так:

$$\mu_{\bar{R}}(x,y) = 1 - \mu_R(x,y), x,y \in Q \quad (5)$$

Обратное к  $R$  отношение обозначается  $R^{-1}$  и определяется так:

$$\mu_{R^{-1}}(x,y) = \mu_R(y,x), x,y \in Q \quad (6)$$

Очевидно, что  $(R^{-1})^{-1} = R$ .

При матричном представлении нечеткого отношения  $R$  обратное отношение  $R^{-1}$  получают из  $R$  заменой столбцов на строки[5].

Нечеткое отношение  $R1$  включено в нечеткое отношение  $R2$ ,  $R1 \sqsubseteq R2$ , тогда и только тогда, когда:

$$\mu_{R1}(x,y) \leq \mu_{R2}(x,y), x,y \in Q \quad (7)$$

Нечеткие отношения  $R1$  и  $R2$  совпадают,  $R1 = R2$ , тогда и только тогда, когда:

$$\mu_{R1}(x,y) = \mu_{R2}(x,y), x,y \in Q \quad (8)$$

Композиция двух нечетких отношений  $R$  и  $S$  обозначается  $R \circ S$  и определяется так:

$$\mu_{R \circ S}(q,w) = \sup \min_{v \in V} (\mu_R(q,v), \mu_S(v,w)) \quad (9)$$

где  $\circ$  – знак композиции.

Такая композиция носит название *(max - min)* - композиции. В случае задания  $R$  и  $S$  в виде матрицы нечеткого отношения операция композиции соответствует обычному произведению матриц, но с заменой арифметического сложения  $+$  на операцию *max* и произведения  $\cdot$  на операцию *min*. Если  $R = S$ , то композиция  $R \circ R$  обозначается через  $R^2$  [2].

Модель алгоритма композиции представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Модель алгоритма композиции

3 Реализация операции композиции над нечеткими множествами на языке программирования верхнего уровня.

За долгие годы нечеткие множества приобрели достаточно обширную математическую базу, но на данный момент практически отсутствуют какие-либо реализации основ нечеткой логики в виде библиотек для языков программирования. Данный аспект негативно сказывается на практическом применении данной области науки. Это послужило для реализации основных операций над нечеткими множествами по средствам языка программирования верхнего уровня Python.

Для примера рассмотрим операцию композиции (перемножения) двух нечетких множеств. Листинг приведен на рис. 2.

```
1 def matrix_composition(first_mtr, second_mtr):
2     rslt_mtr = []
3     second_mtr_transp = []
4
5     for i in range(len(second_mtr[0])):
6         tmp_list = []
7         for j in range(len(second_mtr)):
8             tmp_list.append(second_mtr[j][i])
9         second_mtr_transp.append(tmp_list)
10
11    for n in range(len(second_mtr_transp)):
12
13        for i in range(len(first_mtr)):
14            tmp_list = []
15            for j in range(len(first_mtr[i])):
16                tmp_list.append(min([first_mtr[i][j]], [second_mtr_transp[j][n]]))
17            max_tmp = max(tmp_list)
18            rslt_mtr.append(max_tmp)
19
20    m = 0
21    result = []
22
23    while m < len(first_mtr_var):
24        tmp_list = []
25        prepare_list = range(m, len(rslt_mtr), len(first_mtr_var))
26        for i in prepare_list:
27            tmp_list.append(rslt_mtr[i])
28        result.append(tmp_list)
29        m += 1
30
31    return result
```

Рисунок 2 – Реализация операции композиции двух нечетких множеств

Предположим, что матрицы нечетких множеств заполняются с помощью треугольных функций принадлежности (рис. 3).

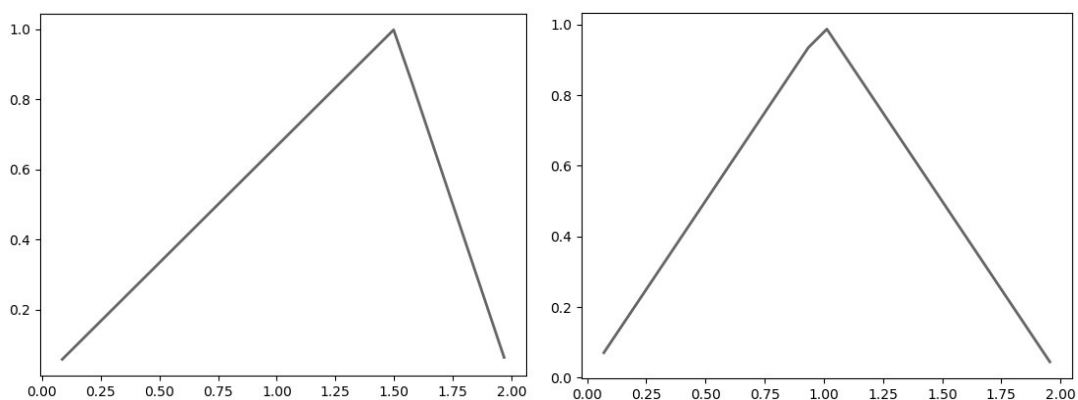


Рисунок 3 – Функции принадлежности нечетких множеств

После вычисления были получены значение матрицы строки, в виде графического изображения (рис. 4).

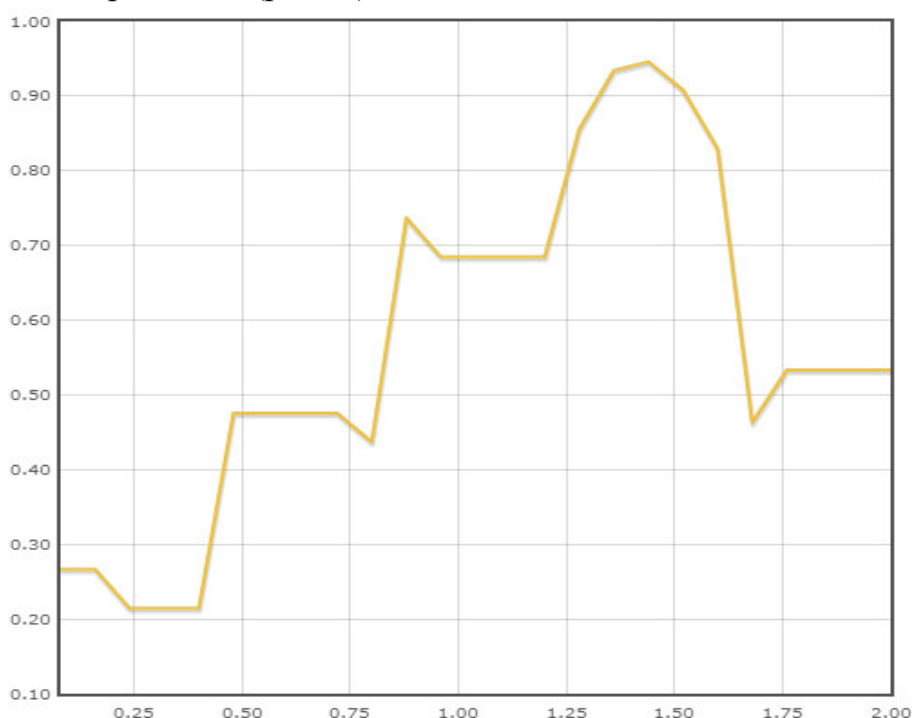


Рисунок 4 – Графическое представление результатов вычисления

Проанализировав данный график мы можем определить наиболее предпочтительное значение исследуемого коэффициента.

#### 4. Заключение

Основной результат представленной работы состоит в том, что был расширен инженерный аппарат нечеткой логики, в частности:

- а) спроектирована модель алгоритма композиции;
- б) модель была реализована на языке программирования Python;
- в) использование языка программирования Python дает возможность эффективно решать поставленные задач, гибко распоряжаться ресурсами, а

главное готовая программа может выполняться на различных типах операционной системы, иными словами – кроссплатформенность.

Все это позволяет в дальнейшем применять область нечеткой логики для реализации прикладных задач.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности исследования реализации математического аппарата нечеткой логики на языке программирования Python.

#### Список литературы

1. Прикладные нечеткие системы / Тэрано Т. [и др.] // М.: Мир, 1993. – 368 с.
2. Рыбин, В. В. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики: Учебное пособие / В. В. Рыбин. – М.: МАИ, 2007. – 96 с.
3. Зайченко, Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю. П. Зайченко. – Киев: Слово, 2008. – 344 с.
4. Бычков, Е. Д. Приложение теории нечетких (fuzzy) множеств в математических моделях систем связи / Е. Д. Бычков, В. В. Лендикрей, Р. З. Салахутдинов // Приложение к журналу «Омский научный вестник». Исследование и материалы. – Омск: Изд-во Омский гос. мед. академии, 2000. – 188 с.
5. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов // М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 284 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Беленков Дмитрий Владимирович**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Аспирант кафедры «Автоматика и системы  
управления» ОмГУПС.  
E-mail: 2911qwerty@mail.ru

**Беленкова Жанна Тадеушевна**  
Военно-космическая академия имени  
А.Ф. Можайского.  
Ждановская, д. 13, 197198, г. Санкт-  
Петербург, Российская Федерация.  
Кандидата физико-математических наук.  
доцент кафедры «Математика».  
E-mail: belenkovaz@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Belenkov Dmitry Vladimirovich**  
Omsk State Transport University (OSTU). 35,  
Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Graduate student of the department  
"Automation and Control Systems" OSTU.  
E-mail: 2911qwerty@mail.ru

**Belenkova Zhanna Tadeushevna**  
Military Space Academy named after  
A.F. Mozhaysky.  
13 Zhdanovskaya st., 197198, St. Petersburg,  
the Russian Federation.  
Candidate of physical and mathematical  
sciences docent at the department  
"Mathematics".  
E-mail: belenkovaz@mail.ru

**Бычков Евгений Дмитриевич**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Доктор технических наук, профессор  
кафедры «Телекоммуникационные,  
радиотехнические системы и сети»  
ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

**Bychkov Evgeniy Dmitrievich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Dr. Sci. Tech., professor at the department  
«Telecommunication, radio engineering systems  
and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

УДК 004.932

**Е. А. Степанова, Е. В. Родина, А. К. Шмаков**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ ОБРАЗОВ**

***Аннотация.** В данной статье выполнен обзор существующих современных методов восстановления искаженных изображений, представлены архитектуры искусственных нейронных сетей, эффективно применяемые для фильтрации, улучшения качества, восстановления утраченных фрагментов изображений. Рассмотрены особенности обработки и восстановления текстовых данных на графическом изображении.*

***Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, интерполяция, глубокое обучение, искаженное изображение, сверточная нейронная сеть.*

**Elizaveta A. Stepanova, Ekaterina V. Rodina, Anton K. Shmakov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **THE POSSIBILITY OF USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO RESTORE SPECIALIZED DISTORTED GRAPHIC IMAGES**

***Abstract.** This article provides an overview of existing modern methods for recovering distorted graphic images. Types of neural network architectures effectively used for filtering, quality improvement, restoring lost image fragments are considered. The features of processing and restoration of text data on a graphic image are considered.*

***Keywords:** artificial neural network, interpolation, deep learning, distorted image, convolutional neural network.*

В настоящее время область применения технологий машинного обучения, в частности искусственных нейронных сетей, постоянно пополняется новыми

направлениями исследований. Безусловно, это один из передовых и перспективных инструментов для решения нетривиальных, не поддающихся стандартным методам анализа задач.

Проблема восстановления искаженных, зашумленных графических изображений актуальна при обработке снимков низкого разрешения, медицинских диагностических данных, при работе со старыми архивными документами и фотографиями, в криминалистике, искусствоведении и многих других областях.

Основными, использующимися на сегодняшний день методами восстановления изображений, являются:

1. Масштабирование (*upscaling*) – процесс повышения разрешения и качества цифрового изображения.

2. Метод слепой деконволюции – метод восстановления изображения без априорной информации о функции размытия точки графической системы, которая определяет «направления смазывания» [1].

3. Применение рекуррентных нейронных сетей, таких как нейронная сеть Элмана, сеть Джордана, сеть Хопфилда, цепь Маркова и т.п.

4. Применение технологии глубокого обучения (*deep learning*).

Помимо данных методов, существует широкий набор сопутствующих инструментов:

- фильтрация шума на графическом изображении (сглаживание кадра);
- увеличение/ уменьшение изображения (масштабирование);
- коррекция геометрических искажений;
- увеличение числа пикселей на координату;
- разбиение на фрагменты и т.д.

В настоящее время существует множество онлайн-сервисов, использующих представленные методы и инструменты. Сравнительная характеристика некоторых из них представлена в табл. 1.

Некоторые продукты, такие как *Adobe Photoshop* для работы с фото и видео способны снизить зашумленность и улучшить качество кадра с использованием бикубической интерполяции. Результаты интерполяции в случае с работой над фото с текстом частую не подходят, так как «сглаживание» четких границ может только снизить читаемость информации с исходного графического изображения.

Как видно из таблицы, большинство подобных сервисов используют простые методы, такие как, фильтрация или интерполяция, однако, для более сложных задач, таких как восстановление старых поврежденных снимков, применяются искусственные нейронные сети (ИНС).

Таблица 1

## Сравнение онлайн-сервисов по обработке графической информации

Сервис	Метод	База	Область использования
Adobe Photoshop	Бикубическая интерполяция	Математический аппарат	Любительские снимки
Let's Enhance	Сверточная нейронная сеть (CNN)	Обучающая выборка – фото природы, животных, зданий	Фотографии животных, природы, зданий
Improve Photo	Фильтры	Математический аппарат	Пейзажи, мультфильмы
Enhance Pho.to	Фильтры	Математический аппарат	Пейзажи, мультфильмы
PinkMirror	Фильтры	Математический аппарат	Портреты людей
Movavi Photo DeNoise	Фильтры, CNN	Обучающая выборка – фото природы, животных, зданий	Фотографии животных, природы, зданий
IMGonline.com.ua	CNN	Обучающая выборка – фото природы, животных, зданий	Фотографии животных, природы, зданий
Webinpaint	Нейронная сеть, фильтры	Совмещение рядом стоящих пикселей, мат. аппарат	Фотографии с водяными знаками
waifu2x.udp.jp	CNN	Обучающая выборка – рисованные персонажи аниме	Фотографии жанра аниме
9may.mail.ru	CNN	Обучающая выборка – военные фотографии	Компьютерное зрение

Нейронные сети активно используются для постобработки изображений благодаря своей гибкости. ИНС находят применение в таких задачах, как: удаление шума и размытия с изображений, восстановление утраченных фрагментов, добавление цвета, увеличение разрешения изображений без потери качества.

Наиболее частые искажения графической информации встречаются при наложении шума, размытии снимка, затирании фрагментов, уменьшении качества изображения (сжатие). Рассмотрим эти ситуации более подробно.

Восстановление изображения с наложенным на него шумом достигается путем анализа соседних пикселей [2]. Для восстановления использовалась программа [3] на основе сверточной нейронной сети. Сверточная нейронная сеть (*CNN – convolutional neural network*) – это специальный вид нейронной сети для обработки данных с сеточной топологией. Свертка – особый вид линейной операции. Сверточные сети – нейронные сети, в которых вместо общей операции умножения на матрицу, по крайней мере в одном слое, используется свертка. Для иллюстрации работы *CNN* было выбрано изображение размера 1080x540 пикселей формата *png*. На рис. 1-3 представлены результаты работы программы [3] при наложении различных видов шумов.



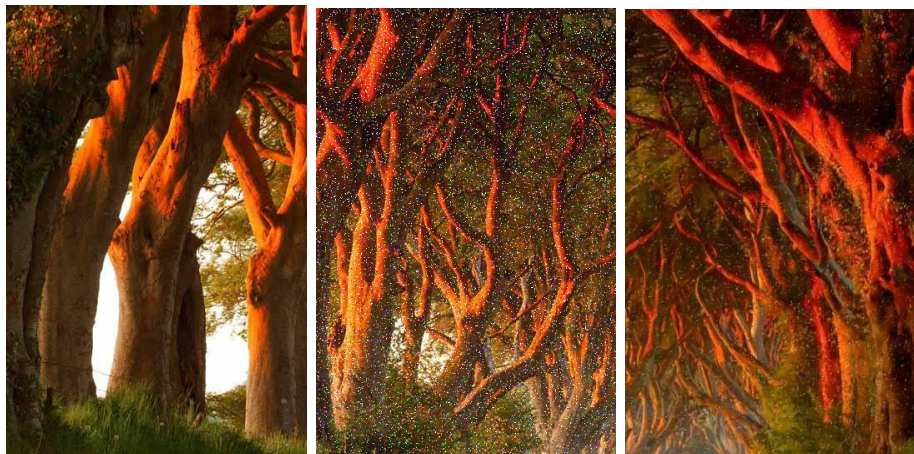
а) б) в)

Рисунок 1 – а) исходное изображение; б) изображение с наложенным шумом Гаусса; в) восстановленное изображение



а) б) в)

Рисунок 2 – а) исходное изображение; б) изображение с наложенным шумом Гаусса с нулевым средним и переменной дисперсией; в) восстановленное изображение



а) б) в)

Рисунок 3 – а) исходное изображение; б) изображение с наложенным шумом «соль и перец»; в) восстановленное изображение

Из рис. 1 и 2 видно, что при небольшом искажении искусственная нейронная сеть восстанавливает изображение практически без потери качества, однако если искажение достаточно сильное (как на рис. 3), после восстановления на изображении остаются артефакты. Нейронные сети хорошо справляются с задачей восстановления при наложении шума.

*DCNN* (*deep convolutional neural networks* – глубокие сверточные нейронные сети) кардинально отличаются от других сетей. Они используются в основном для обработки изображений, иногда для аудио и других видов входных данных. Типичным способом применения *DCNN* является классификация изображений: если на вход подается изображение кошки, сеть выдаст «кошка», если картинка собаки – «собака» [4]. Такие сети обычно используют «сканер», не обрабатывающий все данные за один раз. Например, если имеется изображение 200x200 пикселей и входной слой нейронной сети состоит 40000 нейронов, то из левого верхнего угла будет считываться квадрат размером 20x20 пикселей, а затем выполнится сдвиг на 1 пиксель вправо и данные снова считаются, и т.д. Потом входные данные проходят через сверточные слои, где каждый узел соединен только со своими ближайшими соседями. Эти слои имеют свойство сжиматься, причём обычно они уменьшаются на какой-нибудь из делителей количества входных данных (например, 20 узлов в следующем слое превратятся в 10, в следующем – в 5), часто используются степени двойки. Кроме сверточных слоев есть также так называемые слои объединения (*pooling layers*). Объединение – это способ уменьшить размерность получаемых данных, например, из квадрата 2x2 выбирается и передается наиболее красный пиксель. На практике к концу CNN прикрепляют сеть прямого распространения для дальнейшей обработки данных. Такие сети называются глубокими (*DCNN*). Архитектура сети *DCNN* представлена на рис. 4 а).

*DCIGN* (*deep convolutional inverse graphics networks* – глубокие сверточные обратные глубинные сети) – это вариационные автоэнкодеры со сверточными и развертывающими сетями в качестве кодирующей и декодирующей частей соответственно (рисунок 4 б) [5]. Такие сети представляют черты изображения в виде вероятностей и могут научиться строить изображение кошки и собаки вместе, взглянув лишь на картинки только с кошками и только с собаками. Разработчики также продемонстрировали, что *DCIGN* может моделировать различные сложные преобразования изображений, например, изменение источника света или поворот 3D объектов. Такие сети обычно обучают методом обратного распространения ошибки.

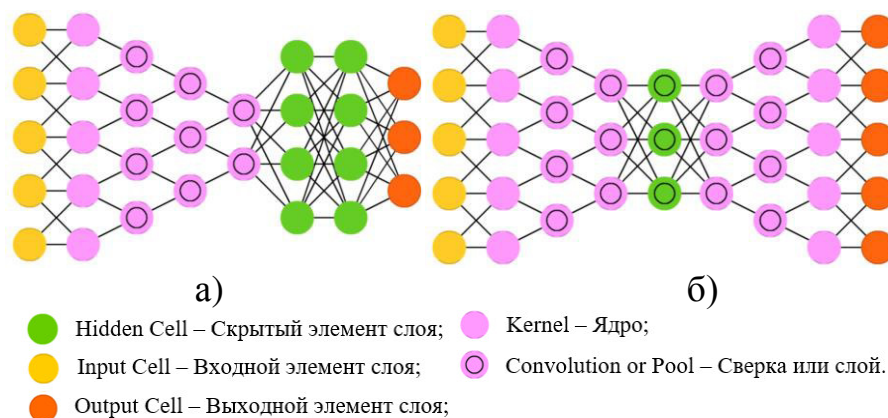


Рисунок 4 – а) архитектура DCNN; б) архитектура DCIGN

Нейронные сети также применяют для восстановления блоков утраченной информации [6]. На рис. 5 и 6 представлены изображения, части которых были восстановлены с помощью программы [7] на основе генеративной состязательной нейронной сети (*GAN*).

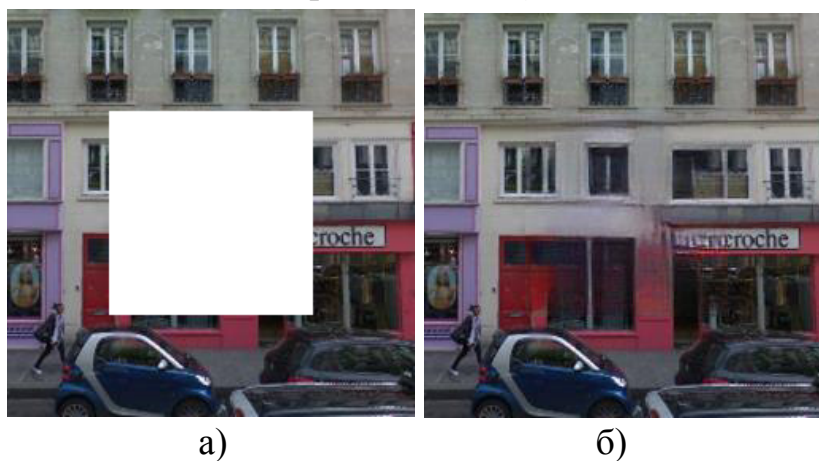


Рисунок 5 – а) исходное изображение; б) восстановленное изображение

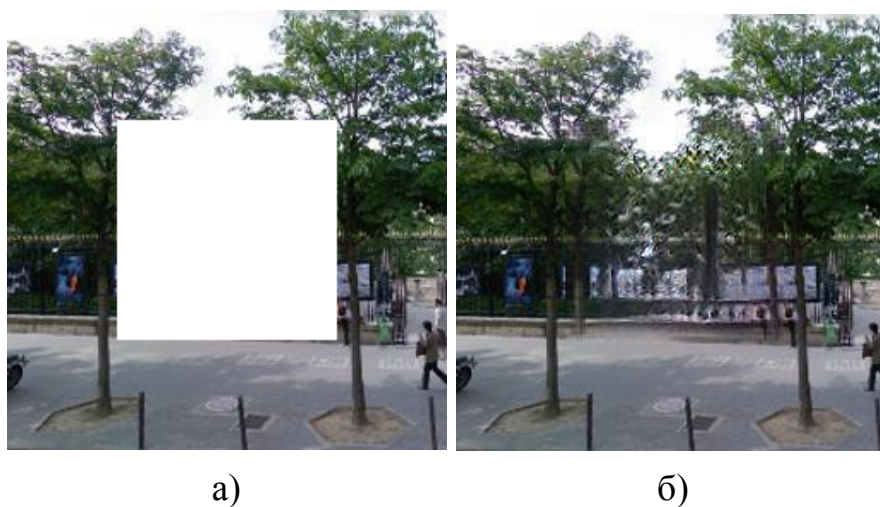


Рисунок 6 – а) исходное изображение; б) восстановленное изображение

Генеративные нейросетевые модели создают некие синтетические данные на основе входной информации. Такие сети состоят из двух ИНС (чаще всего сети прямого распространения – *FFNN* и *CNN*), где одна часть выступает генератором и создает новые образы, а другая – дискриминатором, отличающим подлинные образы от сгенерированных. Точность определения дискриминатором источника данных служит условием для оценки ошибок генератора. То есть происходит своего рода состязание двух сетей: дискриминатор учится лучше отличать реальные данные от сгенерированных, а генератор стремится стать менее предсказуемым для дискриминатора.

Задача обучения *GAN* нетривиальна – необходимо не только обучить две сети, но и найти нужный баланс между ними. Если одна из частей (генератор или дискриминатор) станет более обученной, то *GAN* никогда не сойдется [8].

Алгоритмы, основанные на искусственных нейронных сетях, меняют изображение целиком, поэтому хорошо справляются с дефектами большого размера. Схема генеративно-состязательной нейронной сети представлена на рис. 7 а).

*GAN* не восстанавливает утраченную информацию, а «достраивает» недостающие элементы исходя из информации, присутствующей на изображении. Стоит отметить, что нейронная сеть не сможет восстановить утраченную информацию, а сделает только предположение о том, что может находиться на утраченных блоках. В зависимости от обучающей выборки нейронная сеть может «дорисовать» картинку настолько правдоподобно, что это не будет заметно человеческому глазу. Они используются для получения фотореалистичных изображений, восстановления утраченных фрагментов, улучшения качества изображений и т.д.

*DBN* (*deep belief networks* – глубокие сети доверия) – сети, представляющие собой композицию нескольких ограниченных машин Больцмана (*RBM*) или вариационных автоэнкодеров (*VAE*) (рис. 7 б).

Такие сети показали себя эффективно обучаемыми одна за другой, когда каждая сеть должна научиться кодировать предыдущую. Этот метод также называют «жадным обучением». Метод жадного послойного обучения состоит в принятии оптимального на данный момент решения, чтобы получить подходящий, но, возможно, не оптимальный результат [9]. *DBN* могут обучаться методами *contrastive divergence* или обратным распространением ошибки и учатся представлять данные в виде вероятностной модели, в точности как *RBM* или *VAE*. Однажды обученную и приведенную к стационарному состоянию модель можно использовать для генерации новых данных.



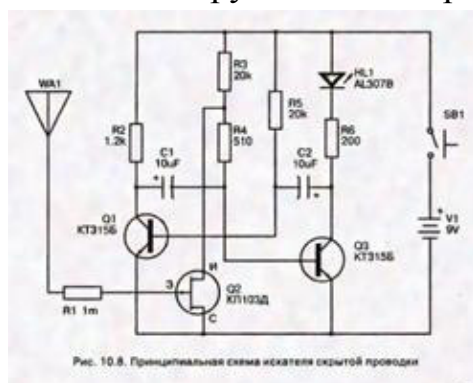
Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что для задач восстановления специализированного искаженного графического изображения наилучшим образом подходят следующие архитектуры ИНС:

- структуры *GAN* (*generative adversarial network*);
- разновидности *CN* (*convolutional network*);
- разновидности *DN* (*deep network*).

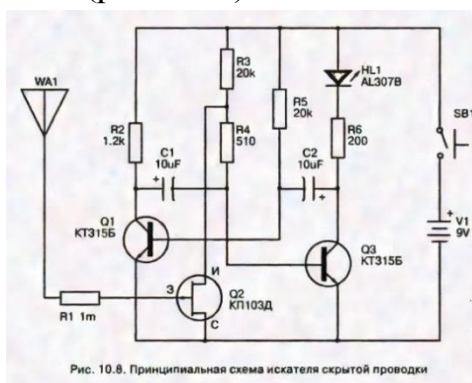
Для получения лучшего результата, перед подачей данных в нейронную сеть, необходимо предварительно отфильтровать шумы с использованием различных интерполяционных алгоритмов, таких как, бикубическая интерполяция, фильтр Ланцоша и других.

Следует отметить, что при выборе архитектуры ИНС, помимо анализа артефактов, следует понимать какую информацию необходимо обработать: пейзаж, портрет, схемотехническая информация, текст, медицинские диагностические данные, какая цветовая гамма у изображения и т.д.

Текстовую информацию на искаженном графическом изображении зачастую довольно затруднительно прочесть (рис. 10 а).



а)



б)

Рисунок 10 – а) искаженное комбинированное изображение;  
б) восстановленное изображение с помощью ИНС

Методика обработки и распознавания текста включает в себя следующие этапы:

1. восстановление искаженного графического изображения (предварительная фильтрация и обработка);
2. идентификация текста на изображении (локализация текстовой области);
3. восстановление текста (работа с областью локализации);
4. распознавание текстовой информации.

На рис. 10 б) представлено комбинированное изображение после обработки сверточной генеративно-сопоставительная сеть (*convolutional generative adversarial network, CGAN*), обученной на случайных выборках [11].

На рисунке видно, что с помощью нейронной сети удалось восстановить

исходное изображение. В некоторых местах размытие сохранилось, однако области с текстом четкие и читаемые. Результат работы нейронной сети позволяет производить дальнейшую обработку с целью локализации текстовых областей и дальнейшего распознавания.

Учитывая все вышесказанное можно сделать вывод о том, что при наличии разнородной информации в обрабатываемом графическом изображении, например, текста и картинки, целесообразно применять разные подходы, такие, как совмещение нескольких нейронных сетей: отдельно для обработки текста, отдельно – для картинок.

### Список литературы

1. Новокшанов, О. Н Восстановление изображений, искажённых свёрткой с неизвестной функцией: автореферат дисс. ... канд. тех. наук: 05.12.04 – радиотехника в т. ч. устройства радионавигации, радиолокации и телевидения. – М., 2001. – 18 с.;
2. Zhang, K. Beyond a Gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising / K. Zhang, W. Zuo, Y. Chen, D. Meng, L. Zhang // Cornell University. – 2016. – 13 p.
3. Dn-CNN-tensorflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/wbhu/DnCNN-tensorflow>, свободный (дата обращения: 08.08.19).
4. LeCun, Y. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // Proc. of the IEEE. – 1998. – 46 p.
5. Tejas, D. Deep convolutional inverse graphics network / Tejas D. Kulkarni, W. Whitney, P. Kohli, J. B. Tenenbaum // NeurIPS. – 2015. – 10 p.
6. Wang, Y. Image inpainting via generative multi-column convolutional neural networks / Y. Wang, X. Tao, X. Qi, X. Shen, J. Jia // NeurIPS. – 2018. – 10 p.
7. Inpainting\_gmcnn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://github.com/shepnerd/inpainting\\_gmcnn](https://github.com/shepnerd/inpainting_gmcnn), свободный (дата обращения: 08.08.19).
8. Generative adversarial nets / Ian J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie [et al.]. – 2014. – 9 p.
9. Bengio, Y. Greedy layer-wise training of deep networks / Y. Bengio, P. Lamblin, D. Popovici, H. Larochelle // Advances in neural inf. processing systems. – 2007.
10. SRN-Deblur [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/jiangsutx/SRN-Deblur>, свободный (дата обращения: 11.08.19).
11. DnCNN-tensorflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/wbhu/DnCNN-tensorflow>, свободный (дата обращения: 12.08.19).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Степанова Елизавета Андреевна**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Информационная безопасность» ОмГУПС  
Тел. +7-983-118-98-80.  
Email: lizadumnova@mail.ru

**Родина Екатерина Витальевна**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент 5 курса группа 25с ОмГУПС.  
Тел. +7-906-197-88-10.

**Шмаков Антон Константинович**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент 5 курса группа 25с ОмГУПС.  
Тел. +7-983-565-73-39.

УДК 621.316

### **О. В. Литвинова**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ**

***Аннотация.** В статье проведен анализ существующих методов определения мест повреждения изоляции кабеля. Из приведенного анализа средств поиска мест повреждения изоляции кабелей следует, что существующие средства не позволяют с достаточной точностью определять места повреждений изоляции кабеля и сделан вывод, какие методы определения мест повреждения изоляции кабеля являются самыми перспективными.*

***Ключевые слова:** кабель, изоляция, повреждение, однопроводная цепь, электромагнитное поле.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Stepanova Elizaveta Andreevna**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
PhD, associate Professor of the Information  
security Department OSTU.  
Phone: +7-983-118-98-80.  
Email: lizadumnova@mail.ru

**Rodina Ekaterina Vitalievna**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35 Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
5 year student, group 25s OSTU.  
Phone: +7-906-197-88-10.

**Shmakov Anton Konstantinovich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35 Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
5 year student, group 25s OSTU.  
Phone: +7-983-565-73-39.

**Olga V. Litvinova**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE LOCATION OF CABLE INSULATION DAMAGE**

***Abstract.** The article analyzes the existing methods for determining the location of cable insulation damage. From the above analysis of means for finding places of damage to cable insulation it follows that existing tools do not allow to accurately determine places of damage to cable insulation and it is concluded what methods are most promising for determining places of damage to cable insulation.*

***Keywords:** cable, insulation, damage, single-wire circuit, electromagnetic field.*

На сегодняшний день существует ряд методов для определения места повреждения кабеля, каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. В научных работах рассматривается большинство из существующих, и востребованных методов и устройства для поиска мест повреждения изолирующих покрытий всех видов кабелей. Изучению методов и средств поиска мест повреждения изоляции кабеля посвящены работы многих авторов например: Шалыта Г.М., Бахмутского В.Ф. и Зуенко Г.И., Манна А.К., Половникова В.А., Парикожка И.А. и Шварцмана В.О., Дементьева В.С., Айзенфельда А.И. и др.

Не смотря на кажущееся многообразие методов, все они подразделяются на дистанционные и топографические, которые следует рассматривать не как взаимно исключаютые, а как взаимно дополняющие друг друга. Совместное использование дистанционного и топографического методов позволяет наиболее быстро и с минимальными потерями находить места повреждения кабеля. В данном случае предполагается двухстадийность определения мест повреждения кабеля. На первой стадии определяется район повреждения, а на второй - место повреждения кабеля. Дистанционные методы позволяют определять район повреждений с точностью 1 – 2 процента длины поврежденной кабельной линии. Топографические методы обеспечивают определение повреждения изоляции кабеля непосредственно на местности с точностью не хуже 1 – 2 м. На коротких кабельных линиях, в пределах нескольких километров, целесообразно использовать одностадийный поиск с применением только топографических методов.

По принципу действия топографические методы можно разделить на три группы:

1) гальванический – основанный на индикации поля тока, стекающего в землю через дефект в изолирующем покрытии кабеля;

2) индукционный – основанный на измерении параметров составляющих электромагнитного поля, создаваемого током протекающим по кабелю с поврежденным изолирующим покрытием;

3) акустический – основанный на индикации акустической составляющей электрического разряда между металлическими элементами кабеля в месте повреждения изоляции, или измерении уровня шума, вызванного утечкой газа (воздуха) в месте повреждения металлической оболочки кабеля в кабелях эксплуатируемых под избыточным давлением, или транспортируемой жидкости для трубопроводов, находящихся под избыточным давлением [1].

Гальванический метод, основанный на измерении градиента потенциала электрического поля на поверхности земли, создаваемого испытательным током, находит все более широкое применение. Он позволяет определять повреждения изоляции с переходным сопротивлением порядка сотен килоом и ниже. Положительным является то, что метод позволяет определять одно или несколько повреждений имеющих на линии.

В России, до настоящего времени еще эксплуатируются следующие устройства: ИМПИ-2, ИМПИ-3, разработанные в Киевском филиале ЦНИИС, ИП-60, ИПИ-76 - в «Союз-энергогазе», УДИП 1 во ВНИИГазе; АНПИ - во ВНИИ строительства трубопроводов. Они отличаются выходными параметрами генераторов, используя для поиска дефекта пульсирующий ток. Эти приборы известны широкому кругу специалистов, они имеют достаточно высокую точность определения мест повреждения и достаточную надежность. Кроме того, имеются современные разработки, в которых использована современная элементная база с частичной обработкой сигнала с применением цифровых технологий. Российский рынок наполнен поисковыми приборами в достаточном количестве, среди которых имеются приборы, реализующие гальванический метод определения места повреждения изоляции этот метод обладает наибольшей точностью, которая может достигать 0,5 м. В то же время применение сверхнизких частот или же пульсирующего, постоянного тока не позволяет использовать предлагаемые приборы в зоне действия электрифицированного на постоянном токе железнодорожного транспорта.

По искажению электромагнитного поля, создаваемого протекающим по сооружению током, можно также определить место повреждения изоляции. Этот метод обладает определенным преимуществом перед предыдущим, поскольку нет

необходимости в создании контакта с поверхностью земли. При протекании по кабелю переменного тока определенной частоты в месте дефекта происходит скачкообразное приращение испытательного тока в кабеле, которое вызывает соответствующее приращение компонент электромагнитного поля.

В целом метод заслуживает внимания, однако, в настоящее время устройства, использующие данный метод, применяются в основном для поиска повреждений жила-жила или жила-оболочка. Для определения возможности использования метода для нахождения однофазных замыканий на землю нужны дополнительные исследования.

Акустический метод в настоящее время используется, в основном для поиска сквозных повреждений на подземных сооружениях, эксплуатируемых под избыточным давлением.

Из приведенного анализа средств поиска мест повреждения изоляции подземных кабелей следует, что существующие средства не позволяют с достаточной точностью определять места повреждений изоляции кабеля в условиях действия электрифицированного железнодорожного транспорта. Наиболее перспективными методами являются гальванический и индукционный.

Теоретические основы определения мест повреждения изолирующих покрытий кабеля базируются на достижениях теоретической электротехники, электродинамики, электрохимии, теории длинных линий и электрических цепей.

Распределение токов и потенциалов на оболочке или токоведущей жиле кабеля, как и любой другой направляющей системы, определяется ее параметрами. Кабель, имеющий полимерный шланговый покров, является однопроводной цепью следовательно эта цепь имеет четыре первичных параметра и два волновых. Под словом кабель понимается или алюминиевая оболочка, имеющая полимерный шланговый покров, или токоведущая жила кабеля без металлических покровов.

Теоретические положения о закономерностях формирования компонент электромагнитного поля в различных средах, через которые могут определяться электрические параметры кабелей, изложены в работах Е.Д. Зунде, М.П. Бадер, И.И. Горднева, М.И. Михайлова и Л.Д. Разумова, И.В. Стрижевского, К.Г. Маркварда, Г.Г. Маркварда, М.Г. Шалимова, С.А. Щелкунова, Э.В. Венса и др.

Наиболее просто компоненты электромагнитного поля можно получить через вектор потенциальной функции, которые для различных сред приводятся в современной технической литературе [2, 3].

Распространение электрического сигнала по длине однородной линии и электромагнитное влияние между линиями определяются электрическими

параметрами линии, а также величиной и количеством нагрузок, подключенных к линии, координатами этих нагрузок. Этому вопросу посвящено достаточное количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов: В.И. Коваленкова, Е.Д. Зунде, П.К. Акульшина, В.Н. Кулешова, М.В. Стрежевского, И.И. Гроднева, М.И. Михайлова и др. Большинство из перечисленных работ посвящено получению и анализу решений дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают изменение параметров распространяющегося по длине линии сигнала.

По известным параметрам распространяющегося по кабелю сигнала представляется возможным определить компоненты электромагнитного поля кабеля с поврежденным изолирующим покрытием. Изучением электромагнитного поля кабеля занимались: В.Р. Бурсиан, А.В. Вешев, А.И. Заборовский, Г.А. Лавров и А.С. Князев, Л.Г. Поздняков [4], и др.

Компоненты электромагнитного поля определяют для элементарного источника. Интегрируя необходимые компоненты элементарного источника по длине, определяют поле кабеля. В общем случае получаются сложные осциллирующие подынтегральные функции, которые не выражаются через элементарные. Для получения решений вводят или допущения, упрощающие подынтегральные функции, или используют численные методы интегрирования.

Для определения компонент электромагнитного поля кабеля на поверхности земли воспользуемся вектор – потенциальной функцией, обоснованно вводя упрощения и используя численные методы интегрирования.

Расчетные выражения получим для однородной земли. Учет неоднородностей геоэлектрических параметров земли можно осуществить известными методами, которые позволяют сделать переход от неоднородной геоэлектрической структуры земли к однородной с эквивалентным удельным электрическим сопротивлением  $\rho_3$ . Методы приведения неоднородной структуры земли к эквивалентной однородной достаточно полно освещены в работах Б.И. Косарева, М.Г. Шалимова, Позднякова и др.

Вопросы защиты подземных сооружений от коррозии и распространению токов и потенциалов в системе «рельс-земля-подземное сооружение» посвящены работы И.В. Стрижевского [5], И.В. Стрижевского и В.И. Дмитриева, А.В. Котельников, В.В. Красноярского, Н.П. Глазова, и др.

#### **Выводы:**

1. Методы определения расстояния от места измерения (начала кабеля) до места повреждения называются относительными методами. Относительные методы

не гарантируют высокую точность определения места повреждения, но указывают зону, в которой имеется повреждение, и дают возможность использовать в этой зоне абсолютные методы, т.е. методы с помощью которых непосредственно можно определить место повреждения.

2. Определение мест повреждения изоляции кабеля в условиях действия электрифицированного железнодорожного транспорта существующими средствами сопряжено с большими временными, трудовыми и материальными затратами.

#### Список литературы

1. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. – М., 1982. – 309 с.

2. Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. – 773 с.

3. Бурсиан, В. Р. Теория электромагнитных полей применяемых в электроразведке / В. Р. Бурсиан. – Л.: Недра, 1972. – 367 с.

4. Поздняков, Л. Г. Исследование электромагнитного поля бесконечно длинного провода над многослойной землей // В кн.: Проводная связь и радиосвязь на железнодорожном транспорте / Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – 1965. – Т. 52. – С. 119 – 128.

5. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами / И. В. Стрижевский. – М.: Стройиздат, 1982. – 236 с.

6. Котельников, А. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами / А. В. Котельников. – М.: Транспорт, 1986. – 279 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Литвинова Ольга Владимировна**  
Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Инженер, кафедры «Телекоммуникационные,  
радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: Litvinova69.08@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Litvinova Olga Vladimirovna**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Engineer of the department  
"Telecommunications, radio systems and  
networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: Litvinova69.08@mail.ru

**Е. Д. Бычков<sup>1</sup>, Д. А. Титов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## **МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

***Аннотация.** Разработан метод классификации параметров объектов с использованием самоорганизации, дающий возможность адаптивно изменять количество классов в зависимости от структуры входных данных на основе теории нечетких множеств.*

***Ключевые слова:** классификация параметров, самоорганизация, нечеткие множества.*

**Evgeniy D. Bychkov<sup>1</sup>, Dmitry A. Titov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

<sup>2</sup>Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## **THE CLASSIFICATION METHOD OF THE PARAMETERS OBJECT BASED ON SOFT COMPUTING**

***Abstract.** A method for classifying the parameters of objects using self-organization is Developed, which makes it possible to adaptively change the number of classes depending on the structure of the input data based on the theory of fuzzy sets.*

***Keywords:** classification of parameters, self-organization, fuzzy sets.*

В настоящее время задача распознавания объектов (радиолокационных целей) имеет высокую актуальность. Так, например, информация о классе и типе объекта позволяет выявить приоритетные цели из множества других. При этом большое значение имеет выбор информативных и устойчивых признаков, а также алгоритмов принятия решения о принадлежности объектов к тому или иному классу (типу) целей [1, 2]. Одним из вариантов построения алгоритмов классификации параметров объектов является использование нечеткой логики [3] для динамической корректировки количества классов в процессе обработки поступающих данных.

Пусть имеется последовательность входных векторов  $x^p \in X$ , каждый из которых представлен  $N$  компонентами:  $x^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_i^p, \dots, x_N^p)$ . Данную последовательность необходимо разбить на классы, которые заранее не известны и должны формироваться динамически по мере поступления входных

данных. Классы данных характеризуются своими ядрами [ 4], которые также представлены набором векторов с N компонентами:  $c^m = (c_1^m, c_2^m, \dots, c_i^m, \dots, c_N^m)$ . Близость вектора и класса, а также близость двух классов могут быть оценены на основе функций [4]

$$d(x^p, c^m) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^p - c_i^m)^2}$$

и

$$d(c^m, c^k) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i^m - c_i^k)^2}, k \neq m \text{ соответственно.}$$

Вместо рассмотренных функций возможно использование других, например представленных в работах [3, 5].

Модель классифицирующего устройства будем задавать в виде нечеткой базы знаний, которая представляет собой совокупность правил ЕСЛИ-ТО, связывающих лингвистические оценки входных и выходных переменных. Действие такой модели описывается функционалом

$$c^m = F\{\tilde{X}^p, M\},$$

где  $\tilde{X}^p$  – нечеткое множество, элементами которого являются векторы  $x^p$ ,  $M$  – количество классов данных, т. е.  $m=1, 2, \dots, M$ .

Будем считать, что классы входных данных не известны, и их количество необходимо изменять в процессе обработки входной информации. Корректировка количества классов требуется после прихода каждого нового входного вектора.

Прежде всего, рассмотрим классификацию входных векторов не уделяя внимания организации и корректировке множества классов. Каждый входной вектор  $x^p$  должен быть отнесен к одному из имеющихся классов  $c^m$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ .

Для принятия решения о принадлежности входного вектора к одному из организованных классов  $c^m$  могут быть использованы нечеткие множества, элементами которых являются  $x_1^p, x_2^p, \dots, x_i^p, \dots, x_N^p$ . Согласно [3] каждому элементу нечеткого множества соответствует значение функции принадлежности из диапазона [0,1]. Наибольшее распространение в технических приложениях получили ступенчатая аппроксимация и аппроксимация функции принадлежности кривыми Гаусса. Последний тип аппроксимации предполагает использование функций принадлежности на основе выражения

$$\mu^m(x_i^p) = A_i \cdot \exp\left[-\left(\frac{x_i^p - c_i^m}{\sigma_i}\right)^2\right], \quad (1)$$

где  $A_i \in [0, 1]$ ,  $\sigma_i$ , – параметры настройки функций принадлежности,

устанавливаемые экспертным путем. Степень принадлежности вектора  $x^p$  классу  $c^m$  определяется в соответствии с выражением  $\mu^m(x^p) = \min[\mu^m(x_1^p), \mu^m(x_2^p), \dots, \mu^m(x_i^p), \dots, \mu^m(x_N^p)]$ .

Итогом решения задачи классификации векторов  $x^p$  является нахождение номера  $m^*$  класса  $c^{m^*}$  к которому этот вектор принадлежит. Для каждого вектора  $x^p$  можно записать, что  $\mu^m(x^p) \equiv \mu(c^m) \equiv \mu(m)$ . Решение об отнесении вектора  $x^p$  к тому или иному классу может быть принято на основе выражения

$$m^* = \arg \max_m (\mu(m)). \quad (2)$$

Организация (корректировка) классов входных данных  $c^m$  производится на основе анализа поступающих на вход системы векторов  $x^p$ . Будем корректировать количество классов  $M$  после прихода каждого десятого вектора. Для учета влияния элементов вектора  $c_i^m$  на близость между двумя классами  $c^m$  и  $c^k$ ,  $k \neq m$  при вычислении значений  $d(c^m, c^k)$  может быть использовано взвешенное суммирование. Весовыми коэффициентами могут быть значения  $\mu(i) \in [0, 1]$ , которые рассматриваются как значения функции принадлежности нечеткого множества <ВЛИЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ>. В этом случае функция расчета близости между классами будет определяться выражением:

$$d(c^m, c^k) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \mu(i) \cdot (c_i^m - c_i^k)^2}, \quad k \neq m. \quad (3)$$

Как было рассмотрено ранее после поступления на вход системы десяти новых векторов и принятия решения об их принадлежности классам  $c^{m^*}$  требуется проверить необходимость создания нового класса  $c^{M+1} = x^p$ . Решение о создании нового класса принимается если

$$d > d_{\max},$$

где  $d = d(x^j, c^h)$ ,  $d_{\max} = \max(d(c^h, c^k))$ ,  $j$  - индекс вектора, имеющего минимальное значение принадлежности к классу,  $h$  - индекс класса, к которому принадлежит вектор с минимальным значением принадлежности,  $k = 1, 2, \dots, M$ ,  $k \neq h$ . В противном случае новый класс не создается.

Для правильного размещения кластеров в пространстве необходимо формализовать нахождение их границ. Определение границ классов входных данных может осуществляться различными способами. Наибольшее распространение получило представление границ в виде окружности (для двумерного пространства), центр которой соответствует ядру класса. Иными словами для классов определяются "радиусы" или "диаметры" [4], которые характеризуют удаленность векторов класса от его ядра. Оценить радиус  $m$ -го

класса можно на основе выражения

$$R^m = \max(d(x^p - c^m)), x^p \in c^m, \quad (4)$$

т. е. радиус класса - это расстояние между ядром класса и максимально удаленным от ядра вектором, принадлежащим этому классу.

Оценкой «радиуса»  $m$ -го класса также может служить минимальное значение степени принадлежности векторов, принадлежащих классу:

$$r^m = \min(\mu^m(x^p)), x^p \in c^m. \quad (5)$$

В отдельных случаях может возникнуть необходимость объединения нескольких классов. Предположим, что на вход системы поступил вектор  $x^p$ , который имеет одинаковые степени принадлежности к классам  $c^m$  и  $c^k$ ,  $k \neq m$ , т. е.  $\mu(c^m) = \mu(c^k)$ , при этом  $\mu(c^m)$  имеет достаточно большое значение (например,  $\mu(c^m) > 0,5$ ). В этом случае можно предположить, что классы  $c^m$  и  $c^k$  целесообразно объединить. Будем считать, что значение  $\mu(c^m) = \mu(c^k) = \mu$ ,  $k \neq m$  характеризует близость между классами  $c^m$  и  $c^k$ . Так, например, при использовании функции принадлежности (1) значения  $\mu(c^m)$  возрастают при уменьшении расстояния между вектором и классом.

Таким образом, чем больше значение принадлежности  $\mu(c^m) = \mu(c^k)$ ,  $k \neq m$ , тем ближе расположены в пространстве классы  $c^m$  и  $c^k$ . Критерием объединения двух классов может служить радиус классов. Рассмотрим случай двумерных входных данных, когда принадлежащие кластерам области пространства представляются окружностями. Пусть существует два класса  $c^1$  и  $c^2$ , имеющих одинаковый радиус  $R^1 = R^2 = R$  и их области перекрываются (рис. 1).

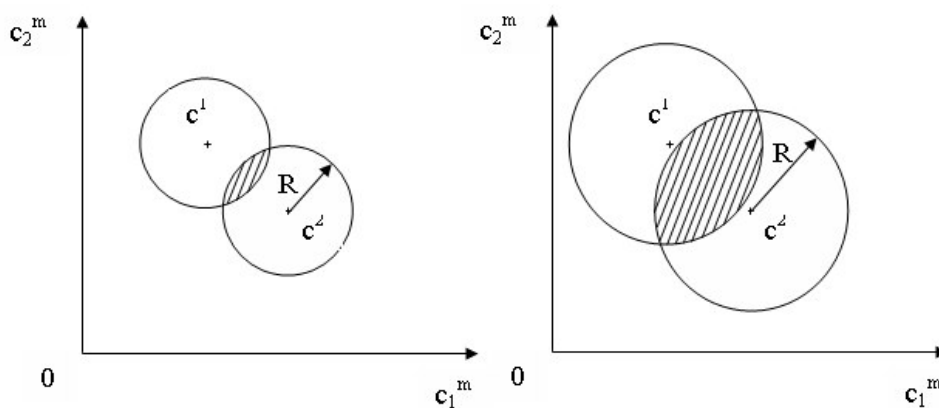


Рисунок 1

Рисунок 2

При увеличении радиуса классов (в случае неизменного положения ядер) увеличивается площадь перекрытия областей, принадлежащих классам (заштрихованный участок на рис. 2). Следовательно, в данных условиях

целесообразно объединять классы с большими значениями  $R$ . Как было указано ранее, вместо  $R^m$  можно использовать значения  $r^m$ .

Учитывая сказанное выше можно сформулировать правило объединения классов, использующее значения их радиусов. Если вектор имеет два равных значения степеней принадлежности  $\mu(c^m)$  и  $\mu(c^k)$ ,  $\mu(c^m) > 0,5$ ,  $k \neq m$  (обозначим индексы этих классов  $m'$  и  $k'$ ) то необходимо выполнить следующие действия:

ЕСЛИ  $\mu > \min(r^{m'}, r^{k'})$ ,  $k \neq m$ , ТО объединить классы  
 $c^{m'} := (|c_1^{m'} - c_1^{k'}|/2, |c_2^{m'} - c_2^{k'}|/2, \dots, |c_i^{m'} - c_i^{k'}|/2, \dots, |c_N^{m'} - c_N^{k'}|/2)$ ,  
 $M := M - 1$ ,

ЕСЛИ  $\mu < \min(r^m, r^k)$ ,  $k \neq m$ , ТО не объединять классы.

Таким образом, чем больше удалены данные от классов (чем меньше значения  $r_m, r_k$ ) тем меньшее значение может иметь  $\mu(c)$  для принятия решения об объединении классов.

В некоторых случаях классы  $c^m$  и  $c^k$  необходимо объединять при  $\mu^m(x^p) \neq \mu^k(x^p)$ ,  $k \neq m$ . Например, можно объединять классы, имеющие близкие значения  $\mu^m(x^p)$  и  $\mu^k(x^p)$ ,  $k \neq m$ . Как известно [3], если некоторый объект  $x$  обладает свойством  $R$  (порождающим нечеткое множество  $A$  лишь в частной мере, т.е.  $0 < \mu_A(x) < 1$ , то он принадлежит сразу двум противоположным классам: классу объектов, "обладающих свойством  $R$ ", и классу объектов, "не обладающих свойством  $R$ ". При этом объект может принадлежать рассмотренным классам с разной степенью. Такая неопределенность принадлежности объекта максимальна, когда степени принадлежности объекта обоим классам равны, т.е.  $\mu_A(x) = \mu_{\bar{A}}(x) = 0,5$ , и минимальна, когда объект принадлежит только одному классу, т.е. либо  $\mu_A(x) = 1$  и  $\mu_{\bar{A}}(x) = 0$ , либо  $\mu_A(x) = 0$  и  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1$ . Поэтому будем проверять возможность объединения только тех классов  $c^m$  и  $c^k$ , значения  $\mu^m(x^p)$  и  $\mu^k(x^p)$ ,  $k \neq m$  которых превышают 0,5. При близких значениях  $\mu^m(x^p)$  и  $\mu^k(x^p)$ ,  $k \neq m$  можно считать, что мерой близости классов  $c^m$  и  $c^k$  является значение  $\Delta = |\mu^m(x^p) - \mu^k(x^p)|$ . Чем меньше значение  $\Delta$ , тем ближе расположены в пространстве классы. При этом также можно считать, что с увеличением значений  $\mu^m(x^p)$  и  $\mu^k(x^p)$  классы также располагаются ближе друг к другу. Критерием объединения классов может служить выполнение следующего условия:

$$(\min(\mu^m(x^p), \mu^k(x^p)) - 0,5) > \Delta, k \neq m. \quad (6)$$

В табл. 1 показан пример выполнения данного правила для случая дискретных значений  $\Delta$  и  $\min(\mu^m(x^p), \mu^k(x^p))$ ,  $k \neq m$ .

Пример выполнения правила

$\Delta$	$\min(\mu^m(x^p), \mu^k(x^p))$				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	Н	Д	Д	Д	–
0,2	Н	Н	Д	–	–
0,3	Н	Н	–	–	–
0,4	Н	–	–	–	–

В данной таблице буква Д говорит о необходимости объединения классов, а буква Н означает, что классы не объединяются.

Будем применять рассмотренные правила классификации для каждого вектора, поступающего на вход системы. Корректировку классов будем производить после поступления на вход системы каждого десятого вектора. Таким образом, алгоритм классификации параметров объекта может быть разделен на два этапа: классификация и накопление данных (I этап) и корректировка классов (II этап).

Структурная схема устройства, реализующих рассмотренный алгоритм классификации двумерных входных векторов, приведены на рис. 3. На рис. 3 показана структурная схема, предназначенная для накопления (записи) выборки векторов в память. Наряду с записью данная схема принимает решение о принадлежности вектора к одному из  $M$  имеющихся классов и вычисляет степень принадлежности вектора к классу.

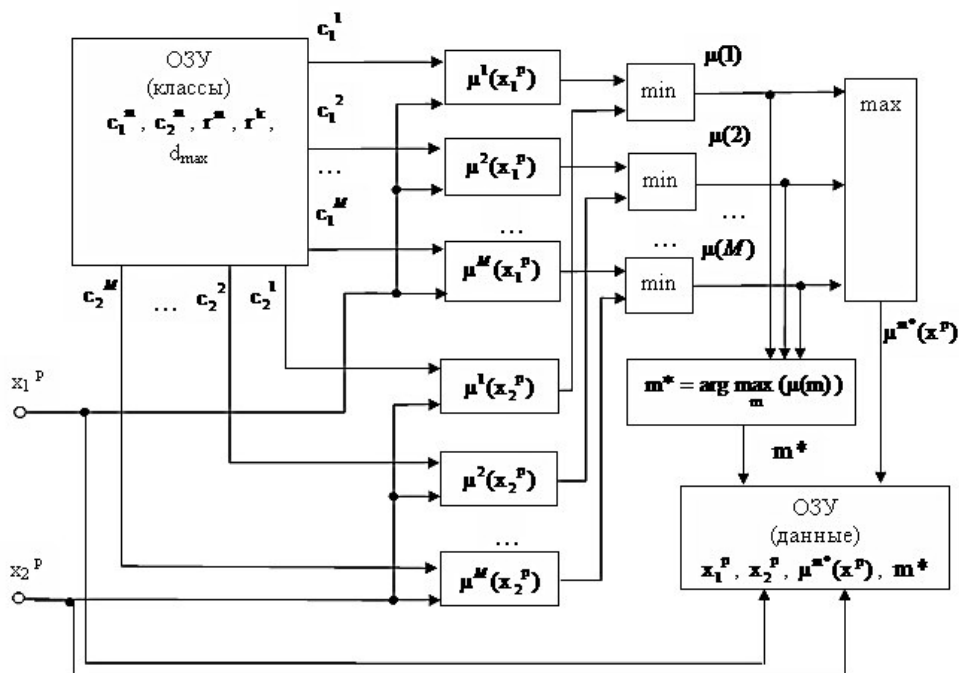


Рисунок 3 – Структурная схема устройства

Предложенный метод классификации может быть применен в современных телекоммуникационных и радиотехнических системах, осуществляющих классификацию данных на основе самоорганизации в условиях быстро изменяющейся обстановки.

#### Список литературы

1. Гульшин, В. А. Распознавание радиолокационных целей на основе анализа диаграммы обратного рассеяния / В. А. Гульшин // Труды VI Всероссийской научно-практической конференции. Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем. – Ульяновск, 2009.
2. Кутузов, В. М. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / В. М. Кутузов, Ю. А. Коломенский, Ю. М. Казаринов ; Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Академия, 2008. – 592 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
4. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 744 с.
5. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Высш. шк., 2002. – 440 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бычков Евгений Дмитриевич** Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

**Титов Дмитрий Анатольевич** Омский государственный технический университет (ОмГТУ).  
Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ.  
Тел.: +7 (3812) 65-25-98.  
E-mail: dtitov2@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Bychkov Evgeniy Dmitrievich**  
Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Dr. Sci. Tech., professor at the department «Telecommunication, radio engineering systems and networks» OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: bychkov\_ev@mail.ru

**Titov Dmitry Anatolyevich**  
Omsk State Technical University (OmSTU)  
11, Mira st., Omsk, 644050,  
the Russian Federation.  
Candidate of technical Sciences, docent department of "Radio engineering devices and diagnostic systems» OmSTU.  
Phone: +7 (3812) 65-25-98.  
E-mail: dtitov2@yandex.ru

**О. Н. Коваленко<sup>1</sup>, К. С. Фадеев<sup>1</sup>, М. С. Гуртовой<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>ВИТ ЭРА, г. Анапа, Российская Федерация

## **МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПРИ ВЫБОРЕ ОБОРУДОВАНИЯ SOFTSWITCH**

***Аннотация.** На данный момент на технологических сетях железнодорожного транспорта идет повсеместный переход к пакетной коммутации и конвергенции различных видов связи в единую сеть, что порождает актуальность проблемы выбора аппаратуры не только для российских операторов, но и зарубежных. Цель работы разработка математической модели содействия принятию решения выбора производителей аппаратуры SoftSwitch, основанная на методе интегральной оценки.*

***Ключевые слова:** пакетная коммутация, интегральная оценка, технологическая связь, SoftSwitch.*

**Olga N. Kovalenko<sup>1</sup>, Konstantin S. Fadeev<sup>1</sup>, Macsim S. Gurtovoy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

<sup>2</sup>VIT ERA, Anapa, the Russian Federation

## **INTEGRAL ASSESSMENT METHODOLOGY FOR SELECTING SOFTSWITCH EQUIPMENT**

***Abstract.** At the moment, technological networks of railway transport are making a universal transition to packet switching and convergence of various types of communications into a single network, which raises the urgency of the problem of choosing equipment not only for Russian operators, but also for foreign ones. The purpose of the work is the development of a mathematical model to facilitate decision-making in the selection of SoftSwitch equipment manufacturers based on the integrated assessment method.*

***Keywords:** packet switching, integrated assessment, technological communications, SoftSwitch.*

В основе выбора телекоммуникационного оборудования лежит задача принятия оптимального решения. Под задачей принятия оптимальных решений понимается выбор из множества возможных решений таких, которые являлись бы в определенном смысле лучшими или оптимальными. Как правило, выбор

решений производит некоторое лицо, принимающее решение (ЛПР), основываясь на определённых критериях. В зависимости от ситуации в роли ЛПР может выступать как отдельный человек (инженер, научный сотрудник, заказчик), так и целый коллектив (группа специалистов, занятая решением одной задачи). Каждое возможное решение характеризуется определенной степенью достижения цели. В соответствии с этим у ЛПР имеется свое представление о достоинствах и недостатках решений, на основании которого одно решение предпочитается другому [1].

Перед тем как приступить к сравнительному анализу, необходимо провести выбор оценочных критериев и осуществить их ранжирование по значимости. Выбор критерия оптимальности для нахождения наилучшего решения из множества допустимых связан с математической интерпретацией представления ЛПР об оптимальности решения. Данный процесс получил отражение в двух подходах: ординалистический и кардиналистический [1].

Ординалистический подход основан на попарном сравнении альтернативных решений и выборе оптимального. Метод парных сравнений основан на попарном сравнении альтернатив. Для каждой пары альтернатив эксперт указывает, какая из альтернатив предпочтительнее (лучше, важнее и т. д.). Существует ряд алгоритмов, реализующих метод парных сравнений: они различаются по количеству используемых экспертных оценок (индивидуальные и коллективные оценки), по шкалам сравнения альтернатив и т. д. Примером такого подхода может служить метод Саати [2].

Кардиналистический подход определяет предпочтение ЛПР при помощи введении целевой функции, значение которой определяет полезность решения. При таком подходе может быть задана формализованная процедура выбора оптимальных решений (критерий оптимальности) из условия экстремума (минимума или максимума) целевой функции на множестве допустимых решений [1]. Однако из-за нехватки информации и противоречий требований появляется необходимость введения совокупности частных целевых функций, которые характеризуют значимость решения с точки зрения разных требований (критериев). В связи с этим возникают более сложные задачи оптимизации решений по совокупности различных признаков, которые также называются задачами многокритериальной оптимизации.

В случае многокритериального выбора и речь идет о компромиссном решении – решении, которое не может быть улучшено ни по одному из критериев без ухудшения по другим критериям [3].

Существует множество методик для решения задачи

многокритериального выбора, одной из которой является теория нечетких множеств. Интерпретация данной теории может выглядеть следующим образом. В качестве контролируемых параметров систем выступает множество критериев, характеризующих оборудование SoftSwitch, и множество допустимых вариантов по заданным критериям. В процессе анализа особенностей аппаратуры по выделенному множеству критериев эксперты осуществляют оценку оборудования в виде нечеткого высказывания, описывающего лишь примерную область возможного выбора.

Принятие оптимального решения выбора аппаратуры будет осуществляться при помощи нечеткого интеграла, представляющего собой макси-минную композицию двух нечетких множеств. Первое множество может представлять апостериорную оценку какого либо выбора, а второе множество – априорную оценку отдельных признаков на множестве критериев. Результатом нечеткого интегрирования является нечеткая мера апостериорного множества, которая может быть интерпретирована как «степень нечеткости», «степень важности» и т.д. [4].

Еще одним методом принятия решения является метод минимального риска. Он основан на разбиении рассматриваемого диагностического пространства на области из условия, что средний риск был минимален. С помощью отношения правдоподобий и сравнения его с пороговым значением можно реализовать процесс оптимального выбора [4].

Под задачей выбора понимается ситуация ранжирования вариантов по итоговой оценке качества и, в дальнейшем, необходимости выбора наилучшего в некотором смысле варианта из множества рассматриваемых.

В данном проекте осуществим принятие оптимального решения по выбору оборудования на основе методики интегральной оценки. В основе данной методики лежит морфологический подход, для которого характерно выделение списка основных функций и ее разделение на подсистемы по функциональным признакам, а также определение альтернативных способов реализации этих подсистем [5].

В качестве примера остановимся на следующих оценочных критериях:

- стоимость эксплуатации системы связи;
- мониторинг;
- надёжность системы;
- масштабирование системы и удобство пользования;
- дополнительные предоставляемые услуги.

Составим группы критериев по направлениям, опираясь на основные требования и задачи железной дороги.

Для оценки критериев необходимо определить важность каждого направления и критерия в отдельности. Для этого присвоим каждому критерию и направлению показатель важности и значимости соответственно, от 1 до 10, где 10 – критерий наибольшей важности и значимости.

Обратим внимание, что выбор сравниваемых показателей может варьироваться в зависимости от достигаемых задач и целей. Более точное и полное ранжирование критериев можно осуществить на основе экспертных оценок, которые можно формализовать на основе концепций теории нечетких множеств.

Оценку условий выбора осуществим при помощи расчёта максимальных единичных показателей. Для вычислений воспользуемся следующими формулами:

– коэффициент значимости показателей:

$$K_{зп} = \frac{(N_{пр} + 1 - N_i)}{N_{пр}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $N_{пр}$  – количество показателей в рассматриваемом направлении;

$N_i$  – важность  $i$ -го показателя.

– взвешенное значение коэффициента значимости показателя:

$$K_{зв} = K_{зп} \cdot K_{зн}, \quad (2)$$

где  $K_{зн}$  – значимость направления.

– максимальная величина единичного показателя:

$$K_{max} = \frac{K_{зв}}{\sum K_{зв}} \cdot 100, \quad (3)$$

Обозначим, что для примера выбраны следующие значения  $K_{зн}$ : стоимость эксплуатации системы связи – 5; мониторинг – 9; надёжность системы – 10; масштабирование системы и удобство пользования – 7; дополнительные предоставляемые услуги – 6.

Произведем расчет для показателя «Стоимость измерительных инструментов и комплектов запасных частей»:

– коэффициент значимости показателей:

$$K_{зп} = \frac{(2 + 1 - 1)}{2} \cdot 100 = 100$$

– взвешенное значение коэффициента значимости показателя:

$$K_{зв} = 100 \cdot 5 = 500$$

– максимальная величина единичного показателя:

$$K_{max} = \frac{500}{8100} \cdot 100 = 6,41$$

Расчёт фактического показателя каждого критерия ведется по формуле:

$$K_{\Phi_i} = K_{\max_i} \cdot \alpha_i, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент.

Итоговая оценка критерия находится по формуле:

$$K_{\text{И}} = \sum_{i=1}^n K_{\Phi_i} \cdot \alpha_i \quad (5)$$

Произведем расчет для показателя «Стоимость измерительных инструментов и комплектов запасных частей» оборудования ECSS-10, SI3000 CS, ZXSS10 SS1, Протей-МКД:

– фактический показатель критерия:

$$K_{\Phi_1} = 6,41 \cdot 0 - \text{ECSS-10};$$

$$K_{\Phi_2} = 6,41 \cdot 0 - \text{SI300CS};$$

$$K_{\Phi_3} = 6,41 \cdot 0 - \text{ZXSS10SS1};$$

$$K_{\Phi_4} = 6,41 \cdot 0 - \text{Протей-МКД}.$$

Итоговые оценочные коэффициенты аппаратуры на основе рассматриваемых критериев.

Таблица 1

Итоговое оценивание аппаратуры

Оценочный критерий	Производитель оборудования SoftSwitch			
	ECSS-10 (Eltex)	SI3000 CS (IskraTEL)	Протей-МКД (НТЦ Протей)	ZXSS10 SS1 (ZTE)
Итоговый	95,12	93,52	69,8	60,79

По результатам расчетов видно, что исходя из выбранных оценочных критериев, наилучшими из устройств SoftSwitch являются ECSS-10 производства фирмы Eltex и SI3000 CS производства фирмы IskraTEL.

Таким образом, на основе рассмотренной многокритериальной методики интегральной оценки оборудования можно осуществить принятие оптимального решения выбора телекоммуникационных систем с точностью, определяемой экспертными оценками и предпочтениями ЛПР. Полученный результат является оценочным и зависит от приоритета требований экспертов.

Следует отметить, что данная методика актуальна не только при реализации выбора телекоммуникационных систем и устройств, но и при определении технической инфраструктуры ОАО «РЖД» в целом.

#### Список литературы

1. Безрук, В. М. Принятие оптимальных решений в телекоммуникационных сетях с учетом совокупности показателей качества. Ч.1 Методология

многокритериальной оптимизации систем / В. М. Безрук, А. Н. Буханько // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – №1. – С.52 – 66.

2. Тихомирова, А. Н. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов [Электронный ресурс] / А. Н. Тихомирова, Е. В. Сидоренко // Современные проблемы науки и образования: сетевой журн. – 2012. – №2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6009> (дата обращения: 06.12.2018).

3. Шапошников, Д. Е. Применение принципа гарантированного результата для учёта качественной информации о предпочтениях при комплексной оценке качества функционирования телекоммуникационных сетей / Д. Е. Шапошников // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №3. – С.24 – 28.

4. Бычков, Е. Д. Системы контроля и диагностики РЭС: Учебное пособие / Е. Д. Бычков. – Омск, 2015. – 189 с.

5. Лоскутов, А. Б. Методика интегральной оценки уровня энергоэффективности непромышленных объектов / А. Б. Лоскутов, Е. Б. Солнцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №3. – С. 25 – 32.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Коваленко Ольга Николаевна**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: onkovalenko@mail.ru

##### **Фадеев Константин Сергеевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети», ОмГУПС.  
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: fadeev\_spi@mail.ru

##### **Гуртовой Максим Сергеевич**

ВИТ ЭРА.  
г. Анапа, Российская Федерация.  
Оператор научной роты.  
E-mail: scorpion.macs@yandex.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Kovalenko Olga Nikolaevna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Ph. D. in Engineering, Associate Professor of  
the department « Telecommunication, radio  
engineering systems and networks » OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: onkovalenko@mail.ru

##### **Fadeev Konstantin Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Ph. D. in Engineering, Associate Professor of  
the department « Telecommunication, radio  
engineering systems and networks » OSTU.  
Phone: +7 (3812) 31-06-94.  
E-mail: fadeev\_spi@mail.ru

##### **Gurtovoy Macsim Sergeevich**

VIT ERA.  
Anapa, the Russian Federation.  
Operator.  
E-mail: scorpion.macs@yandex.ru

**З. Е. Скуратов, Е. В. Демух**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАКТА ПЕРЕДАЧИ**

***Аннотация.** Рост трафика требует и соответствующего увеличения пропускной способности оптических волокон и систем передачи в целом. На научных конференциях постоянно сообщается о рекордах пропускная способность систем передачи на основе одного ОВ. Дальнейшее увеличение пропускной способности требует новых революционных технологий. Одна из них – технология многосердцевидных ОВ вкуче с мультиплексированием на основе пространственного разделения оптических сигналов. Попытки использования многосердцевидных изделий предпринимались и при построении цепей накачки волоконных лазеров. Такой выбор структуры световода был вызван стремлением обойти ограничения нелинейных эффектов, проявляющихся при высоких значениях оптической мощности.*

***Ключевые слова:** Пропускная способность, многосердцевидное волокно, перекрестные помехи, затухание, тракт передачи, линия задержки*

**Zakhar E. Skuratov, Ekaterina V. Demukh**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **THE USE OF MULTICORE MULTIMODE OPTICAL FIBERS TO INCREASE OF BANDWIDTH OF THE TRANSMISSION PATH**

***Abstract.** The growth of traffic requires a corresponding increase in the bandwidth of optical fibers and transmission systems in general. At scientific conferences, records are constantly reported bandwidth transmission systems based on a single optical fiber. Further increases in throughput require revolutionary new technologies. One of them is the technology of multicore optical fiber coupled with multiplexing based on spatial separation of optical signals. Attempts to use multi-core products were made in the construction of pumping circuits of fiber lasers. This choice of fiber structure was caused by the desire to circumvent the limitations of nonlinear effects that occur at high values of optical power.*

***Keywords:** Bandwidth, multi-core fiber, crosstalk, attenuation, transmission path, delay line*

В процессе построения линейной части волоконно-оптических кабельных трактов, рассчитанных на передачу сигналов со скоростями 40 и 100 Гбит/с,

фокусной областью эксплуатации которых является ЦОД, широко используется схема параллельной передачи. Одним из способов решения задачи формирования параллельного тракта является обращение к многосердцевинным световодам.

Многосердцевинный многомодовый световод оригинальной конструктивной схемы был разработан американской компанией *OFS (Optical Cable Solutions)* и впервые представлен широкой общественности в 2011 г. Его основным отличием от волокон с классической структурой является наличие семи сердцевин меньшего диаметра, которые образуют единое целое за счет наличия общей оболочки. Максимизация параметра эффективности волокна обеспечивается выбором схемы размещения сердцевин «шесть вокруг одного». Фактически разработчиком был создан интегральный аналог регулярного волоконно-оптического жгута. Для обозначения данного типа изделия его создателями используется аббревиатура *MMF (от англ. Multicore Multimode Fibers)*, что может стать источником путаницы из-за того, что воспринимается как сокращение от заметно более привычного широкому кругу специалистов *Multi Mode Fiber*.

Решение на основе нескольких сердцевин, тем или иным способом сформированных в общей оболочке, на момент первых публикаций о новом изделии уже не было абсолютной новинкой в волоконно-оптической технике. Ранее оно применялось при изготовлении полимерных световодов и имело своей целью улучшение их частотных свойств за счет уменьшения числовой апертуры. Неизбежно вызванное этим увеличение результирующих потерь, в основе которого лежит падение эффективности ввода излучения, довольно успешно компенсировалось увеличением количества сердцевин. В случае разработки компании *OFS* обращение к многосердцевинной структуре было вызвано в первую очередь стремлением к улучшению массогабаритных характеристик изделия. Кроме того, достигнуто улучшение некоторых других параметров, значимо повышающих комплексную потребительскую ценность решения в целом.

Кроме того, создателям световода *MMF* удалось добиться улучшения некоторых других параметров, благодаря чему потребительская ценность решения в целом заметно повысилась. Так, наращивание общей пропускной способности канала передачи информации происходит за счет увеличения физического количества отдельных субканалов, а не быстрогодействия электроники приемопередатчиков. Фактически это достигается за счет обращения к принципу пространственного мультиплексирования, одной из практических реализаций которого является схема параллельной передачи [1].

Распространение принципа пространственного мультиплексирования на одиночный кварцевый световод и его реализация в максимально эффективной интегральной форме стали возможны благодаря технологии *Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)*. Разработанная компанией *OFS*, она активно применяется этим известным производителем волоконно-оптической техники еще с конца минувшего века – изначально при формировании заготовок для многомодовых волокон категории OM 3, обеспечивающих лазерную передачу, а с середины первого десятилетия нового столетия для изготовления еще более широкополосных световодов категории OM 4.

Диаметр каждой отдельной световедущей сердцевинки кварцевого *MMF*-волокна составляет непривычные для многомодовой техники 26 мкм. Расстояние между осями периферийных сердцевин равно 39 мкм. Такие геометрические характеристики – результат сложного компромисса между обеспечением малых потерь ввода, оптической изоляции отдельных сердцевин и изгибных характеристик волокна, требуемых для поддержания нормальной эксплуатации кабелей на их основе.

Пока волокно *MMF* может рассматриваться лишь как опытный продукт. Тем не менее, доступные образцы этих изделий обеспечивают стабильные и сравнительно небольшие потери. Коэффициент затухания любой из сердцевин составляет не более 0,5 дБ/км на длине волны 1300 нм. Фактически приведенные цифры означают, что промышленность готова гарантировать потери, которые являются типичными для современной многомодовой техники традиционной конструкции.

Чтобы сохранить максимальную степень преемственности, внешний диаметр волокна (рис. 1), по оболочке сделали равным 125 мкм – размер, ставший уже классическим для волоконно-оптической техники.

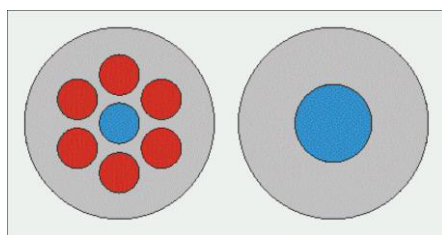


Рисунок 1 – Поперечное сечение волокна:

слева – нового типа; справа – традиционное, 50-микронное градиентное

Световод окружен обычным первичным защитным акрилатным покрытием с внешним диаметром 250 мкм. В результате достигнуто фактически революционное улучшение массогабаритных показателей кабельного сердечника (рис. 2) [2].

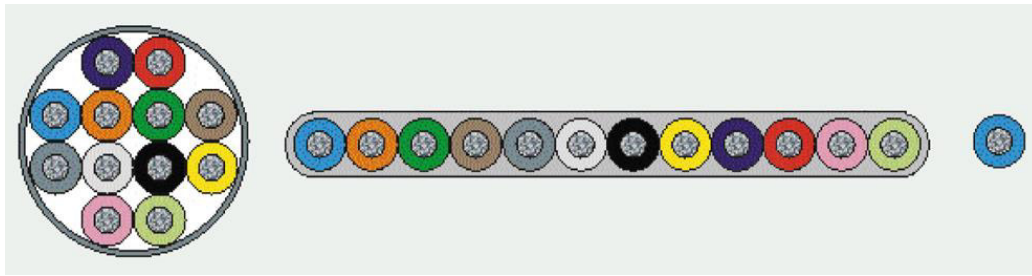


Рисунок 2 – Сравнительные габаритные размеры волокон для параллельной передачи в первичном защитном покрытии: слева – 12-волоконная квазимодульная конструкция; в центре – 12-волоконная ленточная сборка; справа – одиночное волокно с несколькими сердцевинами

При использовании многосердцевинного световода с 12 сердцевинами недавно был установлен рекорд скорости передачи информации по одному световоду – 1 Пбит/с, а в световоде с 22 сердцевинами была получена скорость 2,15 Пбит/с. Также многосердцевинные световоды являются перспективными для использования в локальных сетях доступа и для передачи сигнала в центрах хранения и обработки данных и суперкомпьютерах.

Низкий уровень перекрестных помех и большое число сердцевин – это противоречивые требования для многосердцевинного волокна. Чтобы преодолеть данное противоречие, компания *Fujikura* предложила многосердцевинное волокно с ямой в профиле преломления (рис. 3). Это снижает и взаимовлияние электрических полей в этих сердцевинах.

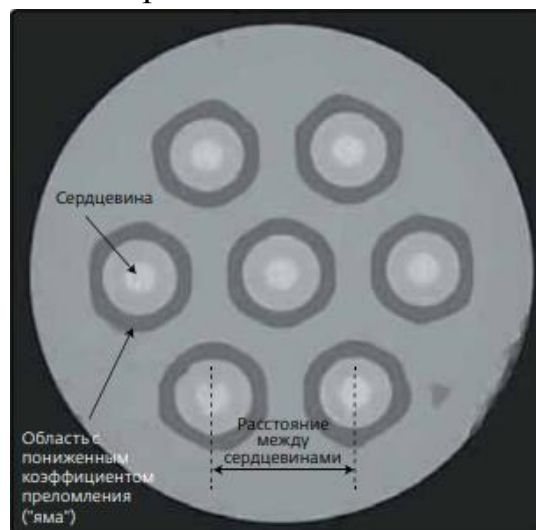


Рисунок 3 – Поперечное сечение семисердцевинного ОВ с ямой в профиле показателя преломления

Уровень перекрестных помех для двух типов многосердцевинных ОВ как функция расстояния между ними (рис. 4). При равном шаге между

сердцевинами перекрестные помехи при наличии ям в профиле на 20 дБ ниже, чем между волокнами с традиционной технологией. Это означает, что при равном уровне перекрестных помех сердцевин с ямами в профиле можно располагать компактнее на 16%. Вдобавок к сниженным перекрестным помехам, технология с ямами позволила получить большую эффективную площадь сердцевин – 110 мкм<sup>2</sup>.

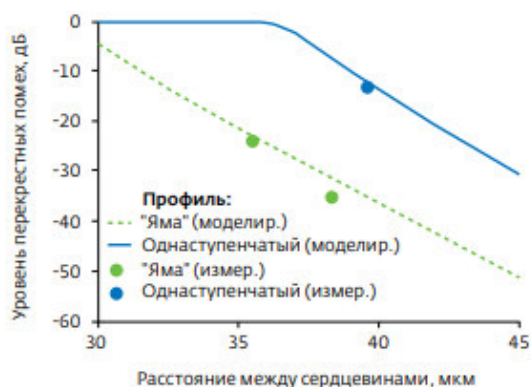


Рисунок 4 – Уровень перекрестных помех между сердцевинами в зависимости от шага между ними на расстоянии 100 км

Простой способ повысить число сердцевин – расположить их в несколько слоев. Так, если мы добавим к ОВ с семью сердцевинами следующий слой по принципу гексагональной решетки, получим ОВ с 19 сердцевинами. При этом шаг сердцевин должен оставаться таким же для сохранения низкого уровня перекрестных помех. Диаметр 19-сердцевинного ОВ увеличивается до 240 мкм по сравнению с 160 мкм для 7-сердцевинного, и как следствие, снижается его механическая надежность. *Fujikura* разработала новое волокно с максимальной эффективной площадью и числом сердцевин при условии, что диаметр ОВ – около 200 мкм.

Поперечное сечение первого в мире десятисердцевинного волокна (рис. 5). Эффективная площадь каждого сердечника от 116 до 125 мкм<sup>2</sup>. Перекрестные помехи между соседними наружными волокнами около – 26 дБ, а между внешними волокнами и внутренним волокном – 56 дБ, что достаточно для стабильной связи [3].

Одним из путей использования многосердцевинных волокон являются линии задержки. При получении длительных времен задержки свыше, например, 100 мкс, основным недостатком волоконно-оптических линий задержки являются высокие масса и габариты, связанные с большой длиной оптического волокна. Уменьшить длину оптического волокна в этом случае возможно за счет использования последовательного прохождения сигнала по сердцевинам многосердцевинного оптического волокна (МСОВ).



Рисунок 5 – Поперечное сечение 10-сердцевинного волокна

Для изготовления линии задержки было использовано 160 м МСОВ. К обоим концам отрезка волокна были пристыкованы и приклеены устройства ввода вывода УВВ1 и УВВ2. В местах стыковки МСОВ и УВВ были измерены оптические потери. Также с помощью рефлектометра временной области были измерены коэффициенты отражения в местах стыковки.

Оптические потери на стыковке МСОВ с УВВ1 и УВВ2 находились в диапазоне от 0,3 до 1,6 дБ. Коэффициенты отражения в местах стыковки не превышали – 40 дБ, что приемлемо для практического использования линии задержки. Потери сигнала в каждом из каналов, включая оптические потери на стыковках и в сердцевинах МСОВ, находились в диапазоне 1,0 – 2,2 дБ. Суммарная величина оптических потерь по всем семи каналам составила 11,4 дБ.

Для измерения параметров волоконно-оптической линии задержки использовался векторный анализатор цепей - ВАЦ. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ) на длине волны 1550,92 нм, мощность излучения после электрооптического модулятора (ЭОМ) в точке А составляла 3 мВт. Была продемонстрирована опытная схема линии задержки (рис. 6) [4].

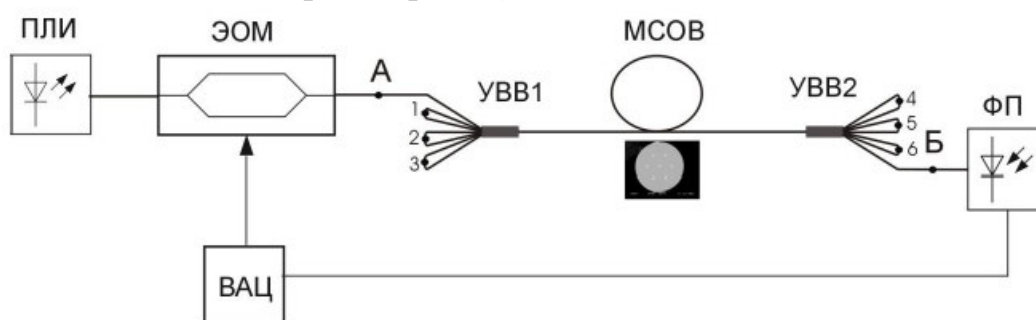


Рисунок 6 – Схема линии задержки на МСОВ

Примером для оценки текущего состояния развития технологии многосерцевидных волокон может послужить следующий эксперимент, результаты которого были представлены некоторое время назад.

Группа компаний и институтов Японии, а именно: *NTT (Nippon Telegraph and Telephone)*, *KDDI Research* (Исследовательский институт в Фудзимино, Япония), *Sumitomo Electric*, *Fujikura*, *Furukawa*, *NEC* и институт *CIT (Chiba Institute of Technology)* совместно разработали многосерцевидные волокна с диаметром оболочки как у стандартных одномодовых волокон.

Данный консорциум компаний определил руководящие принципы проектирования многосерцевидных волокон с обычным диаметром оболочки 125 мкм в соответствии с международным стандартом, а также волокна с диаметром оболочки 250 мкм. Преимущество данных волокон состоит в том, что их можно будет частично использовать с существующими оптоволоконными компонентами.

Был сделан вывод, что четырех-пяти серцевидные ОВ могут быть изготовлены с диаметром оболочки 125 мкм при сохранении того же качества передачи, как и в стандартных волокнах. В итоге на основе сконструированных в *NTT* и *KDDI Research* многосерцевидных волокнах и далее изготовленных несколькими производителями (*Fujikura*, *Sumitomo* и *Furukawa*), была построена экспериментальная линия связи длиной 316 км с пропускной способностью 118,5 Терабит/с с применением многосерцевидных оптических усилителей. Использовались оптические коннекторы *MU* и *SC*-типов производства *CIT* и *NTT*. Конструкция оптических разъемов сделана таким образом, чтобы их можно было вращать для выравнивания и правильной стыковки 4 серцевид.

Параметры волокон получились аналогичные стандартным: рабочий диапазон 1260 – 1625 нм, значение коэффициента затухания в волокнах в среднем составляло 0,21 дБ/км. Линия содержала три усилительных пролета с длинами 104-107 км, многосерцевидные волокна, предоставленные различными производителями, стыковались посредством сварки.

Стоит отметить, что для многосерцевидных волокон уже разработаны многие компоненты: коннекторы, оптические усилители, оптические блоки для разделения/объединения серцевид разных многосерцевидных волокон с целью ввода/вывода сигналов из отдельных серцевид.

Как заявили участники эксперимента, их целью является начать коммерческое использование многосерцевидных волокон со стандартным диаметром оболочки в первой половине 2020-х [5].

## Список литературы

1. Новое решение для сверхскоростной оптической параллельной передачи // ООО «Издательство «Открытые системы». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.osp.ru/lan/2012/06/13016376](http://www.osp.ru/lan/2012/06/13016376).
2. Передовые технологии оптического волокна: от ультрадлинной магистрали до домашней проводки // РИЦ Техносфера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.lastmile.su/files/article\\_pdf/4/article\\_4192\\_844.pdf](http://www.lastmile.su/files/article_pdf/4/article_4192_844.pdf).
3. Волокна будущих петабитных сетей // NAG. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nag.ru/articles/100004/volokna-buduschih-petabitnyih-setey.html>.
4. Структурированные кабельные системы для центров обработки данных // Портал студенческих и научных материалов Ozlib.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ozlib.com/805324/tehnika/mnogoserdtsevinnoe\\_kvartsevoe\\_volokno](https://ozlib.com/805324/tehnika/mnogoserdtsevinnoe_kvartsevoe_volokno).
5. Инновации в области волоконно-оптических сетей // БЕК качества. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/innovatsii-v-oblasti-volokonno-opticheskikh-setey-opyt-brazilii>.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **Скуратов Захар Евгеньевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студент группы 25б ОмГУПС.  
Тел.: +7 (962) 051-46-68.  
E-mail: zs2597@mail.ru

#### **Демух Екатерина Витальевна**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).  
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644046,  
Российская Федерация.  
Студентка группы 25б ОмГУПС.  
Тел.: +7 (999) 470-14-17.  
E-mail: katuffka.com@list.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Skuratov Zakhar Evgenievich**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b OSTU.  
Phone: +7 (962) 051-46-68.  
E-mail: zs2597@mail.ru

#### **Demukh Ekaterina Vitalievna**

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.  
Student of group 25b OSTU.  
Phone: +7 (999) 470-14-17.  
E-mail: katuffka.com@list.ru

**А. Н. Громов<sup>1</sup>, К. С. Фадеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Экоклимат», г. Омск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

***Аннотация.** В статье приводится проблема формализации и количественного оценивания задачи анализа информационной безопасности с позиций технической кибернетики. Приведены варианты количественного описания информационной безопасности.*

***Ключевые слова:** безопасность, надежность, моделирование, информация, анализ, оценка.*

**Andrey N. Gromov<sup>1</sup>, Konstantin S. Fadeev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>LLC «EcoKlimat», Omsk, the Russian Federation,

<sup>2</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **INFORMATION SECURITY ANALYSIS**

***Abstract.** The article presents the problem of formalization and quantitative assessment of the task of analyzing information security from the standpoint of technical cybernetics. Variants of a quantitative description of information security are given.*

***Keywords:** safety, reliability, modeling, information, analysis, evaluation.*

Информационная безопасность (ИБ) может рассматриваться как подзадача научного направления под названием *надежность технических систем*. Это связано с тем, что ИБ включает множество проблем, включающих в том числе:

- техническую надежность информационных систем, обеспечивающих информационное пространство;
- целостность и сохранность информационных ресурсов, включая сознательное или случайное их повреждение (это классически входит в теорию защиты информации);
- варианты и возможности утечек информации, включая технические средства перехвата и перехват бумажной информации;
- противодействия информационным взаимодействиям (нарушения каналов связи, постановка помех, в том числе на высоких уровнях типов IP – взаимодействий и выше);

- административно-правовые проблемы ИБ, организацию генерации, хранения, обработки и использования информации.

Несмотря на многообразие задач и проблем ИБ, с позиций прикладной кибернетики возможно количественное описание безопасности, причем различными математическими методами.

В данной работе ИБ рассматривается исходя из следующих постулатов.

1. Абсолютная безопасность невозможна по определению, так как задача защиты информации относится к классу открытых [2] с нечетко формулируемыми ограничениями и в значительной степени зависит от времени. Кроме того, затраты на защиту могут превосходить стоимость информации.

2. Для формирования политики безопасности следует ориентировать ее на особенности охраняемого объекта (задача адекватной защиты [5]). Это позволит сократить затраты, снизить риски и сделать защиту адаптивной (приспосабливающейся к возникающим проблемам).

3. Проблема информационной безопасности зависит от времени, причем зависимость является недетерминированной, а использование традиционного вероятностного аппарата [4] затруднено вследствие невыполнения основных требований теории вероятности (независимость и однородность статистических выборок). Частично задача может решаться с использованием теории нечетких множеств [5], но остается нерешенной задача адекватности модели и объекта.

Сформулируем теперь общую задачу количественного оценивания информационной безопасности (квалиметрии) и критериев, которые при этом могут использоваться. Сформулируем общую задачу эффективности в виде:

$$W = (\sum P_1) / (\sum Z_J), \quad (1)$$

где  $W$  – коэффициент эффективности защиты информации;  $\sum P_1$  – общая стоимость информации за учитываемый период;  $\sum Z_J$  – совокупные затраты на обеспечение безопасности.

Смысл приведенного выражения очевиден; так же очевидно, что для повышения эффективности желательно снижать затраты, т.е. знаменатель [1].

При составлении политики безопасности с учетом возможности количественного оценивания необходимо категорировать возможные ущербы при нарушениях ИБ по степени влияния, что приводит к модификации выражения (1):

$$W = (\sum P_1) / (\sum \alpha_J Z_J), \quad (2)$$

где  $\alpha_J$  – коэффициент влияния, который может оцениваться на основе статистических исследований или другими методами.

Сюда входит понятие категорирования информации, в том числе с государственной оценкой. В общей формулировке это должно входить в проблему глобальной устойчивости. В данной формулировке это приводит к следующим «начальным условиям»: при имеющейся глобализации информационных взаимодействий, в том числе Интернет, мировая система становится неустойчивой.

Обобщим задачу квалитметрии в следующей форме. Введем в рассмотрение некоторый функционал от коэффициента эффективности  $\Psi(W)$ . Общая задача – максимизация коэффициента эффективности. Остановимся на экономическом критерии эффективности. При этом в соответствии с выражением (2), возможны два типа решений.

1. Качество защиты информации задано и поддерживается в пределах существующих норм. Необходимо обеспечить максимум времени жизни информационных ресурсов при фиксированном уровне качества.

2. При заданных фиксированных показателях качества необходимо минимизировать знаменатель выражения (2). При этом возможно воздействие как на коэффициенты влияния  $\alpha$ , так на оценку стоимости информации. Фактически значения  $\alpha_j$  и  $Z_j$  зависят друг от друга, поэтому задача оптимизации становится многомерной. Для ее упрощения можно упростить знаменатель. При этом возможны следующие варианты.

2.1. Значения  $\alpha_j$  фиксированы. При этом вычисление функционала сводится к минимизации затрат. Совокупность факторов, воздействующих на общий результат, ранжируется (упорядочивается в порядке убывания значимости), для чего возможен принцип нормирования. Выберем составляющую  $Z_{jL}$ , относительно которой приводится сравнение эффективности по принципу значимости:

$$R_S = Z_S / Z_{jL} \quad (3)$$

В этом случае происходит переход к безразмерным количественным оценкам, которые в дальнейшем можно ранжировать.

2.2. Известны значения  $Z_j$ , относительно которых возможно манипулирование коэффициентами влияния  $\alpha$ . При такой постановке задачи также можно перейти к безразмерной величине в соответствии с выражением (3). Также можно ранжировать числовой ряд в порядке убывания.

2.3. Примем коэффициенты влияния  $\alpha$  двумерными, когда существует зависимость показателей  $Z_j$  друг от друга. Приведя показатели  $Z_j$  к безразмерной форме, получим двумерную матрицу, которую можно ранжировать абсолютно, по строкам или столбцам. В этом смысле возможна

трактовка коэффициентов влияния в методологии стандарта сжатия информации JPEG [15].

При этом коэффициенты, умноженные на показатели, ранжируются в порядке убывания и выстраиваются по топологии «змейка», как это показано на рис. 1. После приведения в порядке убывания производится операция округления, на основании которой принимается результат оценки качества. При этом незначимые показатели отбрасываются. Возможен и другой, адаптивный вариант, при котором коэффициенты округления находятся в зависимости от конечного результата. Количество оцениваемых показателей может варьироваться; тогда матрица показателей может иметь другую размерность, не обязательно квадратную.

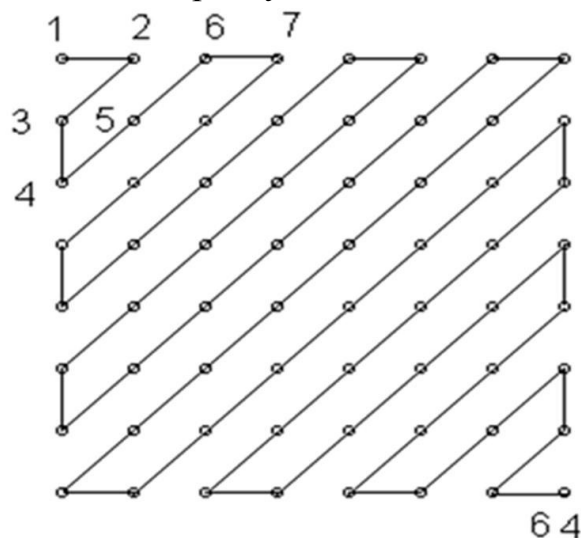


Рисунок 1 – Размещение показателей качества «змейкой».

После предварительной обработки исходной информации возможен выбор математического метода для анализа ИБ, для чего вначале строится модель возможных нарушений, по которой ищутся адекватные противодействия. Главное в моделировании – доказательство адекватности модели и оригинала [3]. При этом рассматриваем казуально-логическую модель.

Данная модель основана на причинно-следственных связях типа «если – то» и отображают последовательность действий потенциального нарушителя (нарушения). Можно привести такой пример. Нарушителю для совершения одного из вариантов нарушений (незаконное копирование, изменение, удаление, порча, фальсификация) желательно получить физический доступ к информационным ресурсам, для чего ему необходимо выполнить последовательность действий. Например, он одним из способов должен проникнуть на охраняемую территорию, получить доступ в здание и



Над диаграммами доступа возможны те же преобразования, что и над обычными ориентированными графами. В частности, возможно приведение к эквивалентному графу последовательной заменой комбинации дуг одной эквивалентной дугой. Такая процедура может использоваться при вычислении совокупного показателя, например, суммарной безопасности. Она хорошо разработана и давно используется на практике.

Для него диаграмма доступа имеет вид, приведенный на рис. 2. Здесь вершинам соответствуют следующие события: 0 – исходное состояние нарушителя; 1 – проникновение в охраняемую зону; 2 – проникновение в зал ПК; 3 – проникновение к файл - серверу; 4 – получение прав пользователя (т.е. регистрация в сети и введение пароля); 5 – присвоение прав администратора; 6 – основная информация на сервере; 7 – служебные каталоги ФС;  $4^1, \dots, 4^N$  – собственные файлы ПК. Показатели  $Z_i$  означают веса действий согласно выражениям (2) или (3).

На рис.2 приведен самый общий вариант диаграммы доступа. Здесь, в частности, не показаны варианты проникновения в другие рабочие группы, не расписаны способы НСД на персональные компьютеры, не обозначены угрозы извне (через системы телекоммуникаций). Но даже отсюда видны наиболее уязвимые информационные массивы. Это прежде всего информация, размещенная непосредственно на ПК, поскольку доступ к ней включает наиболее простую цепочку доступа: 0 – 1 – 2 –  $4^K$  (отметим, что эти данные доступны и администратору из точки 7 – показана только одна дуга с весом  $z_{10}$ ). Поэтому очевидна рекомендация не оставлять свою информацию на ПК – лучше сохранять ее на сервере. Второй ослабленный контур – цепочка 0 – 1 – 2 – 4 – 6. Наиболее слабое звено – пользователи с групповыми правами (участок 2 – 4), поскольку степень защиты здесь хуже наиболее слабой. Очень важно усиление защиты по маршруту 0 – 1 – 3 – 5 – 7, поскольку после проникновения нарушителя в точку 7 ему доступна практически вся информация. Попутно следует заметить, что усиление весов  $z_6, z_7$  и  $z_8$  не всегда желательно, так как при этом возможно усложнение работы законных пользователей, поэтому они будут пытаться сами ослабить эти участки.

На основе модели можно решать достаточно широкий класс задач ИБ. В частности, возможны поиск критических маршрутов и узлов и разработка эффективных стратегий для защиты информации.

Преобразования графов проводятся в соответствии с некоторыми положениями, принимаемыми в качестве следующих аксиом. Обозначим правила формализации преобразования графа.

1. Последовательная цепочка процедур соответствует суммированию показателей  $\beta$ . Цепочка иллюстрирует последовательные операции анализа и

возможные риски и расходы. Математически процедура последовательного замещения выглядит следующим образом:

$$\beta_{\Sigma} = \Sigma \beta_I \quad (4)$$

2. Параллельное соединение дуг соответствует альтернативным вариантам, из которых выбирается единственный с наименьшими затратами, т.е. с наименьшим значением:

$$\beta_{II}^S = \min (\beta_{II}^{SL}) \quad (5)$$

Здесь член в скобках представляет собой альтернативу из нескольких вариантов.

Второй вариант использования параллельного соединения представляет дублирование операций нарушения ИБ. Тогда общее выражение для коэффициента  $\beta_{II}^S$  примет вид:

$$\beta_{II}^S = \beta_{II}^{S1} \beta_{II}^{S2} / (\beta_{II}^{S1} + \beta_{II}^{S2}) \quad (6)$$

Выражения (3) и (6) представляют аналогию с законами преобразования электрических цепей постоянного тока, что имеет определенные преимущества исследования ИБ.

Введем определение *степени вершины*: она определяется количеством примыкающих (отходящих) дуг. Более емкое понятие – *вес вершины*. Он определяется как сумма весов входящих и исходящих дуг:

$$P_R^L = \Sigma \beta_I^L + \Sigma \beta_I^{L+1} \quad (7)$$

где первая сумма - входящие дуги; вторая - исходящие.

Второе определение – *вес маршрута*. Маршрутом будем называть последовательную цепочку вершин и соединяющих их дуг, начинающуюся на первой позиции иерархического графа и оканчивающуюся на последней стадии оценки. Тогда цена маршрута равна сумме весов по всему маршруту:

$$S_Q = \Sigma \beta_W \quad (8)$$

На основе этих определений возможно решение следующих задач, которые можно сформулировать в виде алгоритмов.

**Задача поиска критического маршрута.** Обозначим I – й маршрут через  $L_I$ . Для любого конечного графа количество маршрутов также конечно. Для каждой пары вершин P,Q можно вычислить веса маршрутов  $S_{PQ}$ , которые представляются двумерной матрицей  $P*Q$ , в которой строки представляют конечные состояния синтеза, а столбцы – различные маршруты (если в такой матрице маршрут невозможен, его «забывают» весом  $\infty$ ). Задача оптимизации формулируется следующим образом: среди множества маршрутов найти маршрут от вершины I верхнего уровня к вершине J нижнего уровня, обеспечивающий минимальную цену. Если количество вершин первого уровня равно V, а количество альтернативных исходов – G, то множество оптимальных маршрутов представляется в виде двумерной матрицы E размером  $V*G$ .

Назовем ее **матрицей качества**.

На следующем этапе синтеза проранжируем конечные исходы (т.е. вершины графа) по степени значимости (по последствиям). Выделим исходы, приводящие к необратимым последствиям, в отдельную группу. Тогда совокупность исходов и соответствующих маршрутов, приводящих к этим исходам, выделяются также в отдельную группу, называемую **критической**. Общая задача синтеза в результате заметно упрощается, так как на графе выделяется его подграф, носящий наиболее существенную информацию.

**Задача поиска узловой вершины.** Узловой будем называть вершину с наибольшим весом. В принципе, задача поиска узловых вершин достаточно тривиальна при условии известных показателей  $\beta_j$ . Если эти веса вычисляются с определенными вероятностями, сама задача приобретает вероятностный характер.

Возможна формализация анализа с использованием коэффициентов значимости  $S_j$ . Здесь возможны бинарные или тернарные оценки. В первом случае принимается решение о принадлежности к выделенной конечной вершине по алгоритму:

$$\Delta_j = \begin{cases} 1 & \text{при } \beta_j > S_j \\ 0 & \text{при } \beta_j < S_j \end{cases} \quad (9)$$

При тернарном алгоритме правило решения принимает вид:

$$\Delta_j = \begin{cases} 1 & \text{при } \beta_j > S_j + V/2 \\ 0 & \text{при } \beta_j < S_j - V/2 \end{cases} \quad (10)$$

Стирание при  $S_j - V/2 < \beta_j < S_j + V/2$

где  $V$  – зона стирания (в других источниках она называется зоной нечувствительности). Она может подстраиваться в адаптивном режиме в ходе работы.

При попадании значения  $\beta_j$  в зону стирания возможны несколько вариантов:

- дополнительные мероприятия по повышению достоверности коэффициентов;
- продолжение времени исследований (при условии эргодичности процесса испытаний);
- причисление зоны неопределенности к одному из бинарных решений.

Последнее определяет возможный риск, так как по определению задача носит несимметричный характер (лучше затратить лишние средства, чем потерять информацию).

- экспертные оценки (по опросам специалистов в этой области);
- статистические оценки по реальным событиям;

- физическое или математическое моделирование.

Любой из предложенных методов достаточно сложен вследствие трудности получения исходных данных. Тем не менее, целесообразно применять математические исследования, пусть даже с погрешностями.

#### Список литературы

1. Анин, Б. Ю. Защита компьютерной информации / Б. Ю. Анин. – С-Петербург: БХВ, 2000.
2. Барсуков, В. С. Обеспечение информационной безопасности / В. С. Барсуков // Технологии электронных коммуникаций. – М.: Эко-Трендз, 1996. – Т. 63.
3. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1968.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Герасименко, В. А. Основы защиты информации / В. А. Герасименко, А. А. Малюк. – М., МИФИ, 1997.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Громов Андрей Николаевич**

ООО «Экоклимат».

Яковлева ул., д. 181, г. Омск, 644122,  
Российская Федерация.

Директор.

Тел.: +7 (3812) 59-92-02.

E-mail: gromov\_an75@mail.ru

##### **Фадеев Константин Сергеевич**

Омский государственный университет  
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Телекоммуникационные, радиотехнические  
системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: fadeev\_spi@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Gromov Andrey Nikolaevich**

LLC «EcoKlimat».

181, Yakovleva st., Omsk, 644122,  
the Russian Federation.

Director.

Phone: +7 (3812) 59-92-02.

E-mail: gromov\_an75@mail.ru

##### **Fadeev Konstantin Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,  
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of  
the department « Telecommunication, radio  
engineering systems and networks » OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: fadeev\_spi@mail.ru

**П. А. Мельников**

Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), г. Владивосток, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ РОССИЙСКОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА И НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СФЕРЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

*Аннотация.* Данная статья посвящена рассмотрению концепции российского законодательства и нормативно-правового обеспечения в сфере телекоммуникаций. В статье проведен анализ на предмет актуальности законодательной документации и рассмотрена программа развития стандартизации в телекоммуникациях до 2020 года. Сделаны выводы о значимости стандартизации в области телекоммуникационных сетей и систем.

*Ключевые слова:* телекоммуникации, законодательство в области телекоммуникационных сетей и систем, программа развития стандартизации в сфере телекоммуникаций.

**Pavel A. Melnikov**

Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russian Federation

## **ANALYSIS OF THE CONCEPT OF RUSSIAN LEGISLATION AND REGULATORY SUPPORT IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATIONS**

*Abstract.* This article is devoted to the consideration of the concept of Russian legislation and legal support in the field of telecommunications. The article analyzes the relevance of legislative documentation and considers a program for the development of standardization in telecommunications until 2020. Conclusions are drawn on the importance of standardization in the field of telecommunication networks and systems.

*Keywords:* telecommunications, legislation in the field of telecommunication networks and systems, a program for the development of standardization in the field of telecommunications.

Ведение современной экономической деятельности Российской Федерации основывается на переработке актуальной информации, содержащей четкие и необходимые для передачи или получения данные между различного уровня структурами и обществами. Таким образом, можно сказать, что в современном мире весьма важную роль играет информатизации, как в процессе развития экономики стран, так и общества в целом.

На сегодняшний день телекоммуникационные технологии отвечают за уровень развития технического процесса государства, при этом создавая такие

условия, которые способствуют росту экономики страны и включают ее в мировые интеграционные процессы. Большой объем такого рода процессов заставляет объединять усилия стран в единое целое в целях развития мировых телекоммуникационных сетей [1].

Российские компании и исследовательские Центры активно принимают участие в научно-техническом вопросе области развития мировых телекоммуникационных сетей. Кроме того, для РФ существенным вопросом является тема нормативно-правового обеспечения в области телекоммуникаций.

В данной статье будет рассмотрена концепция российского законодательства и нормативно-правового обеспечения в сфере телекоммуникаций, проведен анализ актуальности законодательной документации и рассмотрена новая программа развития стандартизации в телекоммуникациях до 2020 года.

Правительство РФ уделяет особое внимание вопросу предоставления услуг в области телекоммуникаций. На сегодняшний день существует законодательная и нормативно-правовая база по созданию благоприятных условий при оказании услуг связи в РФ, которая постоянно совершенствуется и ужесточается. Таким образом, в основу цели данного исследования лег анализ основных документов РФ в сфере предоставления услуг связи [2].

Основным и самым важным документом законодательной базы по предоставлению услуг связи в РФ является Федеральный закон «О связи» – ФЗ № 126 от 7 июля 2003 года. Данный ФЗ был разработан в целях защиты интересов людей, использующих услуги связи; создания и обеспечения эффективной и честной конкуренции на рынке, основной целью которого является предоставление услуг связи; создания благоприятных факторов для развития инфраструктуры связи в РФ и обеспечения ее объединения с международными сетями связи [3].

Федеральный закон «О связи» устанавливает правовые аспекты в области связи на всей территории РФ, также документ определяет полномочия органов государственной власти, работающей непосредственно в области связи. Кроме того, ФЗ № 126 устанавливает права и обязанности к тем лицам, которые чувствуют в деятельности связи или просто используют услуги связи (пользователям).

В июне 2019 года в ФЗ «О связи» были введены изменения, которые ужесточили контроль над мобильной связью на территории государства. Такого рода поправки, направлены на запрет продаж мобильных сим-карт без какой-либо регистрации данных покупателя и оформления соответствующего документа. Более того, согласно новым изменениям, полномочия мобильных

операторов и Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора) в области обработки персональных данных существенно расширились.

Такие изменения в федеральный закон являются обдуманными и взвешенными, т.к. правительство РФ давно поднимало вопрос о контроле над ситуацией распространения мобильных сим-карт без регистрации данных покупателя.

Исходя из положений федерального закона «О связи» № 126 от 7 июля 2003 года были разработаны и приняты в действие несколько десятков подзаконных нормативно-правовых актов и постановлений Правительства РФ в области связи. К самым значимым и важным документам можно отнести:

1) Постановление Правительства РФ «О порядке оказания услуг телефонной связи» № 1342 от 9 декабря 2019 года. На сегодняшний день данный документ представлен в новой актуализированной редакции от 27.05.2019. В документе содержатся основные правила и особенности оказания услуг телефонной связи.

2) Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил присоединения сетей электросвязи и их взаимодействия» № 161 от 28 марта 2005 года. Документ устанавливает правила к порядку процесса присоединения сетей электросвязи и их общего функционирования с сетью оператора, который занимает важное положение в сети связи общедоступного пользования.

3) Постановление Правительства РФ «Об утверждении перечня наименований услуг связи, вносимых в лицензии, и перечней лицензионных условий» № 87 от 18 февраля 2005 года. Этим документом утвержден перечень услуг связи, которые в обязательном порядке должны вноситься в лицензии, позволяющие осуществлять деятельность в сфере оказания услуг связи. Кроме того, в данном постановлении установлены перечни лицензированных условий, посредством выполнения которых возможно осуществление деятельности в сфере оказания установленных перечнем услуг связи.

Таким образом, из проанализированных основных законодательных документов в области телекоммуникаций, в частности, в области связи, можно сказать, что на сегодняшний день Правительством РФ и иными структурными подразделениями ведется пристальный контроль и надзор за условиями предоставления услуг в данной отрасли. Кроме того, документы, устанавливающие правила и определяющие условия предоставления услуг связи, постоянно актуализируются и изменяются в соответствии с происходящими изменениями в экономике страны, потребностями потребителя и международными нормами.

На сегодняшний день разработана новая программа стандартизации в сфере телекоммуникаций, реализация которой планируется до 2020 года [4].

Так, изучив подробно и проанализировав основные аспекты данной программы, было выявлено, что результатом ее реализации должны стать абсолютно новые документы по стандартизации в телекоммуникационной сфере. Нормативные документы в сфере телекоммуникаций, которые планируется опубликовать согласно программе стандартизации, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Нормативные документы в сфере телекоммуникаций

Вид нормативного документа	Количество документов (штук)
Стандарты на термины и определения в сфере телекоммуникаций	14
Стандарты на продукцию, относящуюся к сфере телекоммуникаций	27
Стандарты на процессы, относящиеся к сфере телекоммуникаций	21
Стандарты основополагающие общетехнические	107
Стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа)	11

Таким образом, из табл. 1 видно, что вопрос разработки новых стандартов в области телекоммуникационных технологий решается на государственном уровне. Согласно программе по решению вопросов стандартизации в области телекоммуникаций порядка в сумме более 180 стандартов, которые должны выйти в свет уже в ближайшем 2020 году.

Кроме того, в программе приводится комплекс мер, которые направлены на стимулирование производителей и разработчиков телекоммуникационных технологий: привлечение компаний и организаций на разработку государственных стандартов, призыв к международному сотрудничеству с органами по стандартизации, а также разработка программ государственной поддержки организаций, которые применяют национальные стандарты в данной области.

Безусловно, такой подход властей к решению данного вопроса позволит создать наиболее благоприятные условия предоставления услуг, как в области связи, так и в сфере телекоммуникаций в целом.

Сегодняшний рынок телекоммуникаций РФ находится в тенденции постоянного развития, что является нормальным процессом для современного мира. Такое развитие поддерживается и является важной составляющей для государства. Изменения внутри области телекоммуникаций должны своевременно и точно должны отображаться в законодательной и нормативной базе страны [5].

Исходя из анализа документации РФ и программы стандартизации телекоммуникационных сетей и технологий, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день Правительство страны уделяет особое внимание данному сектору экономики. В частности, идет обновление старой нормативной базы, постоянно актуализируются и вводятся нововведения в законодательные документы.

#### Список литературы

1. Ибрагимов, Б. Г. Исследование и анализ эффективности мультисервисных сетей связи при использовании архитектурной концепции NGN / Б. Г. Ибрагимов, С. Р. Исмаилова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 8. – С. 47–49.
2. Хатунцева, Е. А. Анализ основных тенденций развития сетей связи на телекоммуникационном рынке России NGN / Е. А. Хатунцева, А. Б. Хатунцев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – № 10. – С. 71–74.
3. Федеральный закон РФ от 07 июля 2013 (с изменениями 06 июня 2019) № 126. О связи. – Введ. 2003 – 07.07 – М.: Собрание законодательства РФ № 28, 2003. – 2895.
4. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс] / Программа развития стандартизации телекоммуникаций. – Режим доступа: <https://digital.gov.ru/ru> (дата обращения: 10.08.2019).
5. Лазарев, А. Н. Мировой рынок информационных услуг в условиях глобализации: тенденции и направления развития / А. Н. Лазарев. – М: Финансовый университет при Правительстве РФ, 2012. – 2012. – 163 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Мельников Павел Александрович**  
Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ).  
к10, посёлок Аякс, кампус  
Дальневосточного федерального университета, остров Русский, 690922, Российская Федерация.  
Студент 4 курса Б3116-27.03.01стер группы, кафедры инноватики, качества, стандартизации и сертификации Инженерной школы ДВФУ.  
Тел. 89098055812.  
E-mail: [pavel\\_melnikov@mail.ru](mailto:pavel_melnikov@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Melnikov Pavel Aleksandrovich**  
Far Eastern federal University (FEFU)  
building 10, the town of Ajax, the campus of Far Eastern Federal University Russian island, 690922, the Russian Federation.  
4th year student B3116-27.03.01stsr group, department of innovation, quality, standardization and certification in the school of Engineering FEFU.  
Phone: 89098055812.  
E-mail: [pavel\\_melnikov@mail.ru](mailto:pavel_melnikov@mail.ru)

**Т. Н. Нишанбаев, М. М. Абдуллаев, С. О. Махмудов**

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада Ал-Хоразми  
(ТУИТ) г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПРОСОВ ВНЕШНЕГО ТРАФИКА ПО ВИРТУАЛЬНЫМ СЕРВЕРАМ CLOUD-ДАТА ЦЕНТРА**

***Аннотация.** Предлагается внешний трафик, поступающий на контроллер облака, распределять по виртуальным серверам соответствующих сегментов cloud-дата центра с применением метода направленного случайного поиска с покоординатным обучением, позволяющий минимизировать суммарное время пребывания заявок всех пользователей в облачном центре обработки данных. Предлагаемый алгоритм направленного случайного поиска запускается после решения задачи первоначального распределения запросов по кратчайшим путям между контроллером облака и соответствующими сегментами центра обработки данных.*

***Ключевые слова:** cloud-дата центр, центр обработки данных, облачный центр обработки данных, облачные вычисления, виртуальный сервер, облачный сервер, виртуальная машина, физический сервер, структура, контроллер облака.*

**Tuygun N. Nishanbayev, Mirjamol M. Abdullayev, Salimjon O. Mahmudov**

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi,  
Tashkent, the Republik of Uzbekistan

## **DISTRIBUTION OF EXTERNAL TRAFFIC REQUESTS ON VIRTUAL SERVERS IN CLOUD-CENTER DATA**

***Abstract.** It is proposed that the external traffic arriving at the cloud controller be distributed on virtual servers of the corresponding cloud-center data segments using the directional random search method with coordinate-based training, which minimizes the total time spent by all users in the cloud data center. The proposed directional random search algorithm is launched after solving the problem of the initial distribution of requests along the shortest paths between the cloud controller and the corresponding segments of the data center.*

***Keywords:** cloud-data center, data center, cloud data center, cloud computing, virtual server, cloud server, virtual machine, physical server, structure, cloud controller.*

1. Введение. Ресурсы облачного центра обработки данных с распределённой структурой рассредоточены в разных точках, имеют разные мощности и нагружены неравномерно, то есть одни серверы сильно нагружены, а другие не догружены. В целях повышения производительности работы рассредоточенных систем обработки данных на базе физических компьютерных систем создаются виртуальные сервера и обеспечивается параллельное решение несколько задач на одном физическом сервере. При этом виртуальные сервера должны размещаться так, чтобы как можно больше обслужить запросы пользователей и более «полнее» использовать вычислительные ресурсы центра обработки данных. В [1] предложен метод, позволяющий формировать облачные сервера с определенной производительностью и размещать их в соответствующих физических компьютерных системах cloud-дата центра с распределенной структурой, на основе проведения вычислительного эксперимента показана его эффективность.

Данный подход активен в ситуации, когда cloud-дата центр содержит небольшое число рассредоточенных компонентов и подключенных к ним серверов. Когда cloud-дата центр состоит из достаточно большого количества компонентов и подключенных к ним серверных компьютерных систем и систем хранения данных, проблема распределения внешнего трафика между рассредоточенными компонентами cloud-дата центра становится актуальной задачей. В статье предлагается распределять внешний трафик между рассредоточенными виртуальными вычислительными ресурсами cloud-дата центра на основе алгоритма направленного случайного поиска с непрерывным покоординатным обучением [8].

2. Основная часть. Для реализации метода должны быть известны следующие характеристики центра обработки данных:

- топологическая структура облачного центра обработки данных, в которой заданы координаты размещения  $M$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) физических серверов, объединенных с помощью коммутаторами и другими сетевыми устройствами, а также каналами связи транспортной подсети;

- параметры каждого физического сервера (производительность процессора, то есть интенсивность обслуживания заявок, объём памяти и т.д.);

- пропускная способность каналов связи транспортной сети  $\mu_{ij}$ ;

- интенсивность запросов, поступающих на центр обработки данных для обслуживания, то есть суммарная интенсивность внешнего трафика –  $\gamma$ ;

- производительность виртуальных серверов и «точка» их размещения, то есть на основе предложенного в [1] метода определены производительность каждого виртуального сервера и на каком сегменте они размещены;
- экономические показатели (арендная плата за использование ресурсов центра обработки данных и т. д.).

Требуется распределить внешний трафик между виртуальными серверами cloud-дата центра с распределенной структурой таким образом, чтобы минимизировать суммарное время пребывания заявок всех пользователей в облачном центре обработки данных  $T$ , то есть минимизировать выражение:

$$T = \sum (t_n + t_o), \quad (1)$$

где,  $t_n$  – время, необходимое для передачи и обработки заявки в сетевых оборудовании cloud - дата центра;

$t_o$  - время, необходимое для обработки заявки в виртуальных серверах cloud-дата центра) при выполнении ограничений по стационарности потоков.

Заметим, что при формировании физической структуры центра обработки данных вычислительные ресурсы концентрируются в пределах определенных сетевых коммутаторов, то есть несколько компьютеров подключившись в один коммутатор организуют сегмент вычислительного ресурса. В результате такого подключения cloud-дата центр будет состоят из  $S$  ( $s = 1, 2, \dots, S$ ) сегментов, имеющих вычислительные ресурсы с определенной производительностью. Доступ к ресурсам каждого сегмента управляется контроллером облака. Производительность  $i$  сегмента равняется сумме физических производительностей компьютерных систем  $p_j^f$ , подключенных к данному сегменту, т.е.:

$$P_i = \sum_{j=1}^{S_i} p_j^f, \quad (2)$$

Очевидно, что производительность физических компьютеров центра обработки данных будет равна:

$$P = \sum_{i=1}^S (\sum_{j=1}^{S_i} p_j^f) \quad (3)$$

Также отметим, что в cloud дата центре виртуальные сервера имеют разные производительности [1]:

- облачные сервера, с относительно меньшей производительностью;
- облачные сервера со средней производительностью;
- и облачные сервера с относительно высокой производительностью.

Предлагаемый алгоритм случайного поиска реализуется после определения требуемой вычислительной мощности для каждой заявки и решения задачи первоначального распределения заявок по кратчайшим путям между контроллером облака и соответствующими сегментами центра

обработки данных.

Другими словами, считается заданным пространство значений параметров интенсивности внешнего трафика по соответствующим направлениям, то есть:

$$G_i(\gamma_i^1, \gamma_i^2, \dots, \gamma_i^M) \quad (4)$$

где,  $\gamma_i^1$  - значение интенсивности внешнего трафика на входе первого сегмента в  $i$  шаге распределения внешнего трафика в контроллере облака между сегментами cloud-дата центра (распределение внешнего трафика осуществляется в контроллере облака);

$M$  – количество сегментов в cloud- дата центре.

В таком представлении внешнего трафика поставленная задача формулируется так: найти такие значения параметров  $\gamma_i^j$ , которые обеспечат минимум выражения (1).

Суть предлагаемого способа распределения заявок внешнего трафика между рассредоточенными виртуальными вычислительными ресурсами cloud- дата центра сводится к следующему.

В пространстве оптимизируемых параметров (4) выделяется шаг в случайном направлении  $X$  ( $X$  – случайный единичный вектор, отдельные реализации которого направлены во всех направлениях в пространстве параметров).

Если значение целевой функции в новом состоянии меньше предыдущего, то последующий случайный шаг делается уже из этого нового состояния, в противном случае система делает следующий случайный шаг из первоначального состояния.

Таким образом, рабочие шаги делаются целенаправленно в том случае, если направление поиска выбрано верно.

Алгоритм изменения координат вектора  $\overrightarrow{\gamma_i^M}$  можно записать в виде рекуррентного соотношения

$$G_i^{j+1} = G_i^j + \Delta G_i^{j+1}, \quad (5)$$

$$\Delta G_i^{j+1} = d(X_j, A_j), \quad (6)$$

где  $X_j$  – очередная реализация случайного вектора;

$A_j$  – длина рабочего шага,  $A_j = k G_i^j$ ;

$d$  – длина рабочего шага в пространстве параметров;

$G_i^j$  – оптимальные значения компонент результирующего трафика  $G$  за  $j$  шагов;

$k$  – коэффициент пропорциональности.

Целенаправленное воздействие на выбор направления рабочего шага

(составляющая вектора  $\vec{X}$ ) определяется по следующей зависимости:

$$\xi_j = d_j + (\beta_j - \alpha_j) * \eta_{her} \quad (7)$$

где  $\xi_j$  - случайное число, равномерно определенное на отрезке:

$$\alpha_j \leq \xi_j \leq \beta_j \quad (8)$$

$\eta_{her}$ -псевдослучайное число, равномерно распределенное на интервале (0,1).

Величины  $\alpha_j, \beta_j$  определяются по вероятности выбора случайного шага, которая в свою очередь обычно является линейной функцией, то есть:

$$P_j = f(w_j) \quad (9)$$

где  $w_j$ -параметр памяти, который вычисляется по следующей рекуррентной зависимости:

$$w_{j+1} = w_j - \delta \text{sign}\{(\Delta G_i)_j \Delta T[\Lambda(\gamma_i), E(\gamma_i)]_j\} \quad (10)$$

где  $\delta > 0$ - величина, определяющая скорость сходимости;

$(\Delta G_i)_j$  - приращение внешнего трафика для  $i$  - сегмента в  $j$  – случайном шаге.

Физический смысл последнего выражения заключается в следующем: предыдущее  $j$ -значение параметра  $w_j$  увеличивается в случае, если приращение  $\Delta G_i$ , сделанное в предыдущем шаге, привело к положительному результату, т.е. когда  $\Delta T[*]_j < 0$ .

Вероятность выбора случайного шага  $P_j = f(w_j)$  увеличивает вероятность благоприятных шагов.

Увеличение  $w_j$ , в свою очередь, приводит к увеличению значения вероятности благоприятных шагов, т.е. создает наилучшие условия для уменьшения целевой функции. Это достигается определением величин  $\alpha_j$  и  $\beta_j$  на каждом шаге по формулам:

$$\alpha_j = \begin{cases} -1 & \text{при } P_j < 0.5, \\ -1 + (P_j - 0.5) * 2 & \text{при } P_j \geq 0.5, \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta_j = \begin{cases} 1 & \text{при } P_j \geq 0.5, \\ 1 + (P_j - 0.5) * 2 & \text{при } P_j < 0.5. \end{cases}$$

Рассмотренный алгоритм с использованием случайного поиска применяется при распределении внешнего трафика в контроллере облака по виртуальным машинам соответствующих сегментов cloud дата центра.

После просмотра всех вариантов вычисляются новые значения весов ребер (каналов связи) и виртуальных машин сегментов в метрике

маргинальных задержек  $l_i, l_j$ , на основе которых снова запускается подпрограмма перераспределения внешнего трафика по сегментам cloud-дата центра и т.д.

Алгоритм завершает работу, когда ни один из вариантов распределения внешнего трафика не будет улучшать значение целевой функции. На основе алгоритма был проведен вычислительный эксперимент, результаты которой в условиях относительно высокой нагрузки ( $0.75 > \rho > 0.5$ ) позволил улучшить значение целевой функции на  $3.4 \div 4.7$  процентов.

**Заключение.** Резюмируя все изложенное можно отметить, что значение внешнего трафика, поступающие в контроллер облака cloud-дата центра изменяется во времени и применение статических методов распределения их по виртуальным машинам зачастую не приводит к желаемым результатам.

Применение предлагаемого подхода распределения внешнего трафика по виртуальным серверам, особенно в условиях достаточно высокой загруженности, приведет к заметному уменьшению времени пребывания заявок в cloud-дата центре.

#### Список литературы

1. Игнатов, Н. А. Построение задачи оптимизации предоставления виртуальных ресурсов в центрах обработки данных, основанных на облачных технологиях / Н. А. Игнатов // Московский государственный университет путей сообщения. ISSN1815-588X. Известия ПГУПС. – 2014/1.
2. Каспаринский, Ф. О. Оптимизация распределения данных, информации и Медиа ресурсов между локальными и облачными хранилищами / Ф. О. Каспаринский, Е. И. Полянская. – ООО «Мастер-Мультимедиа»
3. Леонов, Д. В. Методы оптимизации поиска в облачных базах данных / Д. В. Леонов. – М.: Московский технологический институт «ВТУ».
4. Тутов, А. В. Моделирование процессов распределения ресурсов в облачных центрах обработки данных / А. В. Тутов, Н. В. Тутова, А. С. Ворожцов // Computer Science, T-Comm. – 2017. – №4. – Т.2
5. Нишанбаев, Т. Н. Метод размещения облачных серверов в cloud-дата центре с распределенной структурой / Т. Н. Нишанбаев // Инфокоммуникации: сети, технологии, решения. – 2017. – №4(44).
6. Нишанбаев, Т. Н. Оптимизационная модель формирования в распределенной сети виртуального вычислительного ресурса / Т. Н. Нишанбаев // Инфокоммуникации: сети, технологии, решения. – 2016. – №1(37).

7. Nishanbayev, T. N. Problems of the distributed systems in infocommunication media network with complex structure / T. N. Nishanbayev, M. M. Abdullaev. – ИТРА.Ташкент, 2015.

8. Нишанбаев, Т. Н. Оптимизационно-имитационные модели и алгоритмы построения и функционирования распределенных вычислительных сетей...Авт. диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. НПО «Кибернетика» АН РУз, Ташкент,1994.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Нишанбаев Туйгун Нишанбаевич**

Ташкентский университет  
информационных технологий имени  
Мухаммада Ал-Хоразми (ТУИТ).  
Проспект Амира Темура, д. 108 г. Ташкент,  
100200, Республика Узбекистан.  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
«Сети и системы передачи данных» ТУИТ.  
Тел.: +99897 759-58-90.  
E-mail:tuyguntn@rambler.ru

##### **Абдуллаев Миржамол Миркamilович**

Ташкентский университет  
информационных технологий имени  
Мухаммада Ал-Хоразми (ТУИТ).  
Проспект Амира Темура, д. 108 г. Ташкент,  
100200, Республика Узбекистан.  
Докторант кафедры «Сети и системы  
передачи данных» ТУИТ.  
Тел.: +99897 423-01-59.  
E-mail: abdullayev87@umail.uz

##### **Махмудов Салимжон Олимонович**

Ташкентский университет  
информационных технологий имени  
Мухаммада Ал-Хоразми (ТУИТ).  
Проспект Амира Темура, д. 108 г. Ташкент,  
100200, Республика Узбекистан.  
Докторант кафедры «Сети и системы  
передачи данных» ТУИТ.  
Тел.: +998 99 7953262.  
E-mail: s.o.mahmudov@gmail.com

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Nishanbayev Tuygun Nishanbayevich**

Tashkent University of Information  
Technologies named after Muhammad al-  
Khwarizmi (TUIT).  
Amir Temur street, 108, Tashkent, 100200,  
the Republik of Uzbekistan.  
DSc, Prof. at the department of “Data  
communication networks and systems” TUIT.  
Tel.: +99897 759-58-90.  
E-mail:tuyguntn@rambler.ru

##### **Abdullayev Mirjamol Mirkamilovich**

Tashkent University of Information  
Technologies named after Muhammad al-  
Khwarizmi (TUIT).  
Amir Temur street, 108, Tashkent, 100200,  
the Republik of Uzbekistan.  
Doctoral student at the department of “Data  
communication networks and systems” TUIT.  
Tel.: +99897 423-01-59.  
E-mail: abdullayev87@umail.uz

##### **Mahmudov Salimjon Olimjonovich**

Tashkent University of Information  
Technologies named after Muhammad al-  
Khwarizmi (TUIT).  
Amir Temur street, 108, Tashkent, 100200,  
the Republik of Uzbekistan.  
Doctoral student at the department of “Data  
communication networks and systems” TUIT.  
Тел.: +998 99 7953262.  
E-mail: s.o.mahmudov@gmail.com

**Б. Х. Очилов, М. М. Хасанов, У. И. Ахтамов**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКОННОГО КАБЕЛЯ**

*Аннотация.* В статье проведен анализ методов диагностики оптического волоконного кабеля. Приведены основные факторы, приводящие к потерям сигнала в оптических кабелях. Перечислены методы тестирования волоконно-оптического оборудования и кабелей. Описана процедура проверки оптического волокна. Показана проверка волоконно-оптической линии связи с помощью оптического рефлектометра временных интервалов.

*Ключевые слова:* диагностика, оптический кабель, оптическое волокно, тестер, рефлектометр, коннектор, модовая дисперсия, калибровка.

**Bobir H. Ochilov, Mirkomil M. Khasanov, Umid I. Akhtamov**

Tashkent State Technical University (TSTU), Tashkent, the Republic of the Uzbekistan

## **ANALYSIS OF DIAGNOSTIC METHODS OF OPTICAL FIBER CABLE**

*Abstract.* The article analyzes the diagnostic methods of optical fiber cable. The main factors leading to signal loss in optical cables are presented. Test methods for fiber optic equipment and cables are listed. The procedure for checking optical fiber is described. The verification of a fiber-optic communication line using an optical time domain reflectometer is shown.

*Keywords:* diagnostics, optical cable, optical fiber, tester, reflectometer, connector, mode dispersion, calibration.

В настоящее время, с каждым днем все больше увеличивается количество корпоративных сетей, существующие сети расширяются, возрастает число пользователей этих сетей. Вместе с этим растут также и требования к передаваемому трафику, пропускной способности, масштабируемости и стоимости, которые являются существенным показателем при построении корпоративной сети.

Существующие методики диагностики оптического волоконного кабеля, как основного связующего элемента коммуникационных сетей, предоставляют обширный спектр возможностей по локализации и исправлению повреждений,

вызванных различными факторами. Однако не все методы и способы нахождения повреждений коммуникационных кабелей эффективны и просты в исполнении при работе с кабелем, а порой требуют использование дорогостоящего оборудования.

Оптические волокна имеют несколько присущих им физических характеристик. Эти характеристики влияют на полосу пропускания, затухание и качество сигнала при передаче на расстояние. В многомодовых волокнах основным фактором, влияющим на качество оптического сигнала, является модовая дисперсия [1].

После установки волоконно-оптической системы, она должна быть тщательно протестирована. Приемочные проверки показывают, является ли устанавливаемый кабель прочным и стабильным, были ли какие-либо дефекты вызваны во время монтажа кабеля, правильны ли рассчитанные на стадии проектирования значения потерь соединений, соединителей, длины волокна, а также работает ли установленная система с надлежащей производительностью [2, 3].

Применяются два основных способа тестирования для передатчика и приемника оптического сигнала. Первое тестирование заключается в испытании выходной мощности передатчика (рис. 1). Передатчик соединен с короткой длиной опорного оптического волокна длиной около 2 м, оптоволокно, являющееся опорным, должно быть того же типа и размера, что и оптоволокно, с которым передатчик должен продолжать работать и которое должно быть установлено в системе. Измеритель мощности подключается к другому концу оптоволокна и записывается значение. Это значение должно быть в пределах  $\pm 5\%$  от выходной мощности, рекомендованной поставщиком передатчика.

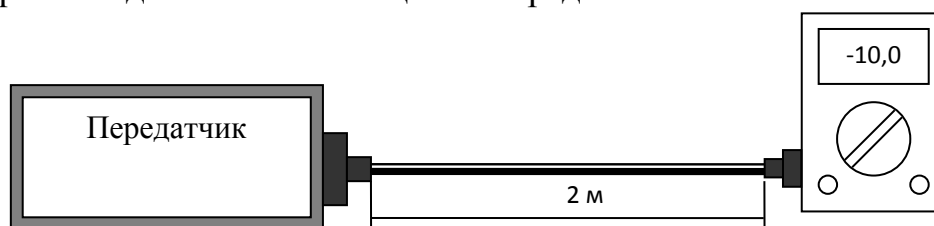


Рисунок 1 – Тестирование выходной мощности передатчика

Второе тестирование проводится для проверки приемной части. Это делается путем подключения передатчика и приемника к эталонному оптоволокну с заданным затуханием, так что уровень принимаемого луча снижается до уровня чувствительности приемника. Это значение должно соответствовать уровню, рекомендованному производителем в спецификациях приемника, затем к передатчику и приемнику подключается тестер ошибок, и частота ошибок по битам проверяется в течение 30 минут. Это подтвердит, что

передатчик соответствует спецификациям производителя и способен нормально работать в системе. Тестирование иллюстрируется на рис. 2.

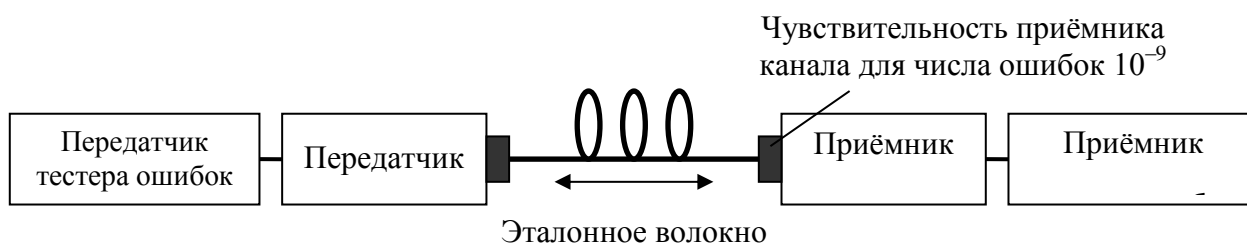


Рисунок 2 – Тестирование приемника

Наиболее значимым этапом испытаний оптоволоконного кабеля считается испытание целостности. Испытание целостности просто проверяет, что оптическое волокно не ломается от одного конца до другого. Оптический луч вводится от источника на одном конце волокна, и его появление наблюдается на другом конце. Этот метод тестирования не предоставляет никакой другой информации, кроме отсутствия разрывов волокна по всей его длине. Первоначально в ходе испытания была получена мощная вспышка от горелки на одном конце оптоволоконного кабеля и наблюдалось появление луча на другом конце. Этот способ хорошо работает с многомодовыми волокнами с большим диаметром сердечника на расстояниях до 500 метров, но на большие расстояния это оказывается ненадежно.

Одним из наиболее широко применяемых способов испытаний, проводимых в волоконно-оптической линии, считается измерение затухания по всей длине волокна. Это значение затухания позволяет протестировать большинство элементов проектируемой системы [2].

Во многих случаях измерение вносимых потерь производится с помощью источника оптического сигнала и измерителя мощности. В начале измеритель мощности калибруется с источником, соединяя оба прибора с коротким отрезком оптического волокна длиной около 2 м. Источник устанавливается на уровень передаваемой мощности -10 дБм, затем показания счетчика устанавливаются на соответствующее значение -10 дБм. Необходимо убедиться, что уровень, используемый для калибровки измерителя мощности, расположен в пределах его динамического диапазона.

После калибровки измерителя мощности он доставляется на место с источником оптического сигнала и подключается к установленной кабельной линии. Полученное устройством результат значения уровня можно использовать для определения затуханий, вносимых в сечение тестируемого кабеля. Процесс тестирования показана на рис. 3.

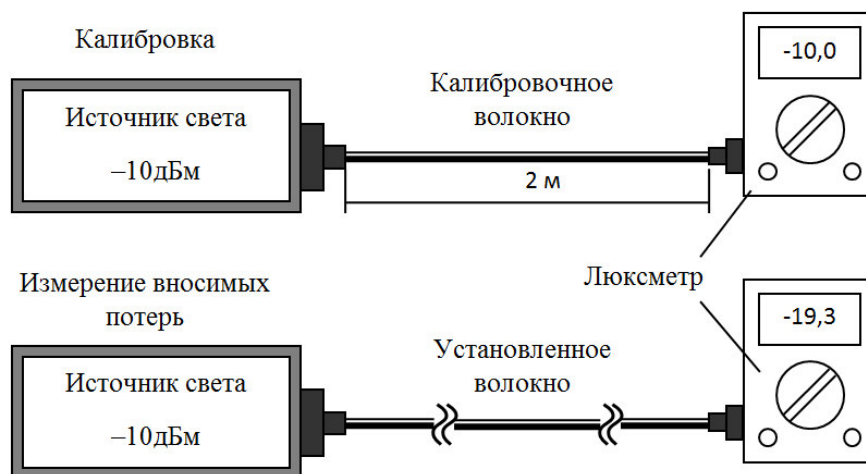


Рисунок 3 – Процесс тестирования волокна

Если источник и измеритель мощности откалиброваны в ваттах, формула для преобразования значения потерь в децибелы следующая:

$$\text{Затухание} = -\log(P_0/P_i) \quad (1)$$

где  $P_0$  – мощность на выходе из волокна;  $P_i$  – мощность на входе в волокно.

Более широко используемым и наиболее эффективным методом проверки состояния ВОЛС является проверка ее с применением оптического рефлектометра во временной области (OTDR) [4, 5]. Рефлектометр посылает короткий импульс по оптическому волокну, измеряет и регистрирует оптическую энергию, отраженную оптоволоком. Отражение может быть вызвано соединителем, трещиной, примесями или волокнистой стружкой. Определив время, необходимое для возврата отраженного луча к источнику, и зная показатель преломления оптоволокну, вы можете рассчитать расстояние до места отражения.

Стеклянные примеси вызывают неизменное отражение малой силы, когда оптический луч проходит через оптоволокну. Это называется обратным рассеянием [5]. Мощность обратного рассеянного луча, получаемого источником, постепенно уменьшается по мере удаления импульса от источника. В рефлектометре это регистрируется как постепенное линейное уменьшение принимаемого отраженного луча, а наклон этого линейного уменьшения представляет собой затухание волокна (дБ на км). На графике (рис. 4) показана типичная кривая отражения рефлектометра и показано обратное рассеяние.

Обычно рефлектометр не дает точных измерений о неравномерности и потерях оптоволокну для первых 15 м кабеля. Это связано с тем, что длительность и время нарастания импульса рефлектометра относительно

велики по сравнению со временем, которое требуется для прохождения импульса на короткое расстояние до точки отражения в пределах этих 15 м и обратно. Чтобы решить эту задачу, между рефлектометром и проверяемой линией связи устанавливается кабельная катушка. При считывании данных с экрана рефлектометра длина первого кабеля не учитывается и называется мертвой зоной [5].

На рис. 4 ось Y показывает относительные амплитуды отраженного оптического сигнала, ось X означает время. Ось времени напрямую переводится и регистрируется OTDR как расстояние.

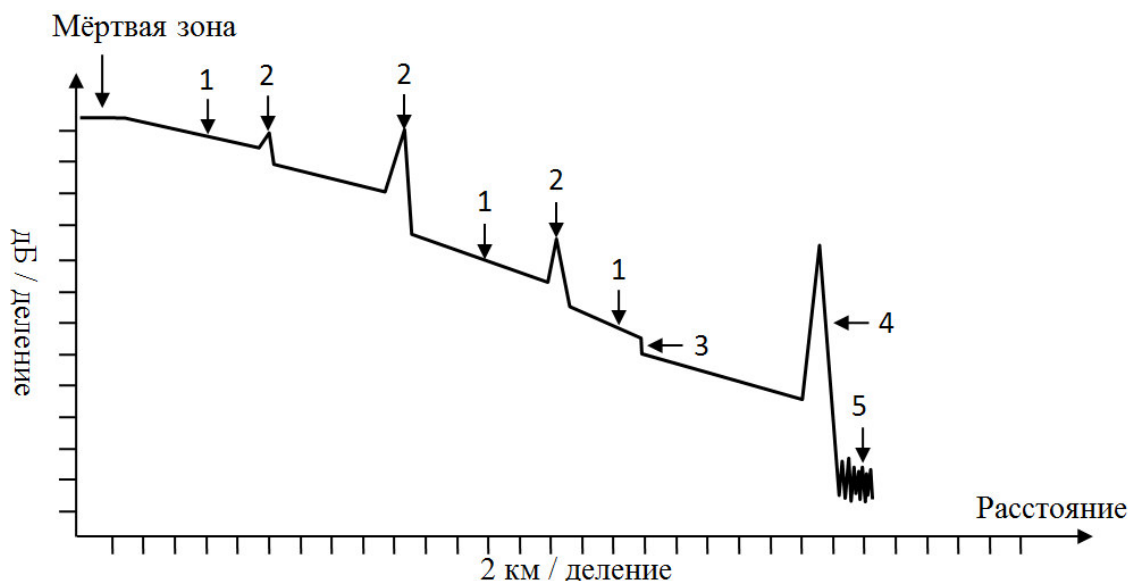


Рисунок 4 – Запись OTDR

На рис. 4 отмеченная точка (3) показывает соединение, в котором жилы оптоволоконна хорошо подходят для излучения оптического луча от источника. В этой связи нет отражения, есть только потеря. Тип падения в точке (3) на кривой затухания также может быть вызван изгибом, через который оптический луч выходит из оптоволоконна и не отражается обратно. Некоторые виды дефектов оптоволоконна также дают тот же результат.

Отмеченная на рис. 4 точка (5) обозначает уровень шума измерителя. Это минимальный уровень принимаемого оптического луча, который может принимать прибор. Измерения, сделанные вблизи этого уровня, не являются очень точными.

OTDR-тестирование способно дать очень точный результат неисправностей практически для любой длины оптического волокна. Перед выполнением тестов необходимо, чтобы между рефлектометром и линией связи всегда была вставлена кабельная катушка мертвой зоны. При использовании

более высококачественных приборов можно получить разрешение 1 м для определения местоположения дефекта и 0,01 дБ для потерь в линии. Некоторые измерительные устройства могут работать с дальностью до 400 км и выше.

Следует проявлять точность при интерпретации результатов, полученных OTDR. На стыке различных оптических волокон это соединение может представлять изменение показателя преломления, размера сердцевины, модальности и свойств материала оптоволоконного кабеля. Например, после подключения или разъема рефлектометр может отображать график, который выглядит как усиление сигнала на дисплее. Возможно, что оптический луч вошел в оптоволоконный кабель с большим количеством примесей, и произошло увеличение уровня обратного рассеяния.

Тест OTDR должен быть выполнен для каждого оптоволоконного кабеля, пока он еще находится в катушке, перед установкой, чтобы убедиться, что поврежденные оптоволоконные кабели не установлены. Результаты этих проверок должны храниться в электронной памяти или в распечатанном документе.

После установки кабеля тесты рефлектометра необходимо повторить для каждого оптоволоконного кабеля, после чего результаты всех тестов после установки можно сравнить с результатами тестов перед установкой, чтобы определить, были ли волокна повреждены или неправильно установлены.

OTDR-рефлектометры способны измерять наиболее точные значения затухания при условии, что применяется более высококачественный рефлектометр, и он регулярно калибруется.

Испытание должно проводиться в обоих направлениях. Определенные виды дефектов находят в одном направлении, но не в обратном. Примером этого является различие диаметров сердечника.

В заключение следует отметить, что некоторые оптоволоконные кабели сконструированы таким образом, что их можно прокладывать по спирали вокруг центра кабеля. В таком случае длина кабеля не будет равна длине оптоволоконного кабеля. Эта разница существенно затрудняет определение расстояния до неисправностей. Чтобы решить эту проблему, производитель обычно предоставляет значение отношения длины оптоволоконного кабеля к длине кабеля. Это отношение используется для расчета точной длины кабеля до дефекта по данным расстояния OTDR. Рефлектометры относительно просты в использовании, и можно загрузить специальные пакеты компьютерного обеспечения, чтобы загрузить результаты испытаний и при необходимости провести детальный анализ. Недостатком технологии рефлектометров является то, что она очень дорогая, даже небольшие устройства с ограниченными возможностями могут быть дорогими.

## Список литературы

1. Свинцов, А. Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС / А. Г. Свинцов // Метрология и измерительная техника в связи. – 2001. – № 6. – С.34 – 38.
2. Иоргачев, Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. – М.: Эко-Трендз, 2002.
3. ГОСТ 26814-86. Кабели оптические. Методы измерения параметров.
4. Устройство для диагностики и оптимизации спектральных характеристик оптоволоконных систем передачи информации / Т. Д. Раджабов А. М. Назаров [и др.] / Патент РУз №IAP №04465. Официальный бюллетень 1(129), 2012, – с.70 – 71.
5. The Device for Diagnostics of Optical Fiber Cables / A. M. Nazarov, R. R. Rakhmonov [et al.] // The European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2017. – №5. – pp.82 – 88.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **Очилов Бобир Халимбоевич**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (93) 541-59-00.

E-mail: ochilov\_bobir@rambler.ru

#### **Хасанов Миркомил Мирхидоят угли**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Ст. преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (97) 730-22-65.

E-mail: khasanov.74@list.ru

#### **Ахтамов Умид Илмурод угли**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Магистрант кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (93) 578-22-65.

E-mail: Umid\_axtamov9095@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Ochilov Bobir Halimboevich**

Tashkent State Technical University (TSTU).  
2, University st., Tashkent, 100068,  
the Republic of the Uzbekistan.

Doctoral student at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

Phone: +998 (93) 541-59-00.

E-mail: ochilov\_bobir@rambler.ru

#### **Khasanov Mirkomil Mirhidoyat ugli**

Tashkent State Technical University (TSTU).  
2, University st., Tashkent, 100068,  
the Republic of the Uzbekistan.

Senior Lecturer at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

Phone: +998 (97) 730-22-65.

E-mail: khasanov.74@list.ru

#### **Akhtamov Umid Ilmurod ugli**

Tashkent State Technical University (TSTU).  
2, University st., Tashkent, 100068,  
the Republic of the Uzbekistan.

Master at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

Phone: +998 (93) 578-22-65.

E-mail: Umid\_axtamov9095@mail.ru

**А. М. Назаров, Б. Х. Очилов, М. М. Хасанов**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

*Аннотация.* В работе рассмотрены методы оценки надежности ВОЛС при эксплуатации. Приведены основные факторы, влияющие на параметры надежности оптических кабелей. Перечислены показатели надежности. Описан метод расчета для оценки надежности при передаче цифровой информации. Произведен анализ расчета срока службы оптического волокна.

*Ключевые слова:* оптический кабель, оптическое волокно, коэффициент готовности, интенсивность отказов, наработка на отказ, цифровая информация, кабельно-линейное сооружение.

**Abdulaziz M. Nazarov, Bobir H. Ochilov, Mirkomil M. Khasanov**

Tashkent State Technical University (TSTU), Tashkent, the Republic of the Uzbekistan

## **ENSURING RELIABILITY OF OPERATING CHARACTERISTICS OF FIBER OPTICAL LINES**

*Abstract.* The paper considers a method for assessing the reliability of fiber optic links during operation. The main factors affecting the reliability of optical cables are presented. Reliability indicators are listed. A calculation method for assessing reliability in the transmission of digital information is described. The analysis of calculating the life of an optical fiber is carried out.

*Keywords:* optical cable, optical fiber, availability, failure rate, MTBF, digital information, cable-to-line construction.

Под надежностью волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) подразумевается свойство объекта выполнять указанные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных параметров в указанных пределах и под надежностью оптических волокон в составе оптических кабелей понимается их способность в течение определенного срока службы обеспечивать передачу сигналов с заданным уровнем потерь.

Надежность ВОЛС зависит от следующих факторов – проектных, производственных и эксплуатационных. Факторы проектирования и производства связаны с разработкой, проектированием и производством оптического кабеля и

других вспомогательных продуктов и устройств, которые являются частью ВОЛС. Эксплуатационные факторы влияют на надежность работы оптического кабеля при его установке, монтаже и последующей эксплуатации.

Обеспечение надежности ВОЛС является сложной задачей, которая включает разработку методов оценки, расчета, контроля параметров, технического обслуживания и совершенствования оборудования станции. Надежность ВОЛС во многом зависит от оптических, физико-химических и структурных параметров волоконно-оптического кабеля [1].

Влага оказывает значительное влияние на надежность ВОЛС, особенно в суровых климатических условиях. Воздействие влаги также происходит в случаях химической коррозии, и разрушение оптоволокна является процессом, зависящим от времени.

Атмосферная влага является наиболее известной и распространенной причиной проявления микродефектов на поверхности оптоволокна в результате селективного гидролиза напряженных химических связей. Влияние влаги на работу оптоволокна в полимере (эпоксиакрилате) было исследовано в [2].

Нагревание оптоволокна до 1000 °С в течение шести часов для сушки приводит к увеличению прочности  $\sigma$  на 15 ... 20% и достигает значения  $\sigma_{ОВ} = 8,3$  ГПа. Обратный процесс накопления воды в полимерном покрытии за несколько часов приводит прочность оптоволокна к исходному значению, которое зависит от влажности окружающей среды. В частности:  $\sigma_{ОВ} = 7,1$  ГПа при влажности 34%;  $\sigma_{ОВ} = 6,0$  ГПа при влажности 50%.

Практический опыт эксплуатации оптических волокон в волоконно-оптических линиях связи указывает на тот факт, что срок службы оптического кабеля сильно зависит от натяжения оптических волокон. Механические напряжения внутри оптоволокна могут появиться по следующим причинам: дефекты производства оптических кабелей, несоблюдение норм прокладки, суточные и сезонные изменения температуры, оседание грунта под различными инженерными сооружениями, обледенение подвешенных оптических кабелей на опорах [3, 4].

Воздействие температуры на оптический кабель приводит к изменению натяжения оптоволокна. Сердцевина из оптического волокна, выполненная из кварца, защитной оболочки, крепежа, коммутационных материалов и грунта, характеризуется различными коэффициентами теплового расширения. По этой причине при значительных изменениях температуры внутри оптоволокна возникают заметные напряжения. Это объясняется неравномерным расширением контактирующих материалов.

В процессе работы ВОЛС необходимо проверить их состояние. Существует несколько способов связи диагностики и мониторинга с объектом контроля: внешний, встроенный и смешанный. Внешняя диагностика подключается к проверяемому объекту только при проверке его состояния. Смешанные средства проверки и диагностики характеризуются наличием встроенных в объект датчиков и преобразователей, которые передают информацию о состоянии объекта по некоторым важным параметрам. Измерительные и контрольные устройства имеют свои собственные ошибки, на них также влияют некоторые факторы, приводящие к отказам диагностического оборудования. Здесь, в частности, необходимо учитывать действия оператора, который принимает решения, поскольку его ошибочные действия могут привести к ошибкам при испытаниях [5].

Показатели надежности подразделяются на расчетные, экспериментальные, эксплуатационные и экстраполированные.

- Расчетные показатели получают путем расчета на основе теоретических моделей и допущений;

- Экспериментальные показатели получают в результате целевого эксперимента;

- Эксплуатационные – оперативно-статистическая обработка данных о сбоях и времени восстановления в процессе эксплуатации;

- Экстраполированные – путем экстраполяции на другую длительность и другие условия эксплуатации.

Расчитанные и экспериментальные показатели больше подходят для оценки надежности конструктивных длин оптического кабеля, а эксплуатационные и экстраполированные показатели больше подходят для определения надежности кабельно-линейных конструкций (КЛС) и ВОЛС.

Самой распространенной универсальной количественной характеристикой надежности является коэффициент готовности, который однозначно связан с коэффициентом вынужденного простоя (или коэффициентом неготовности). Коэффициент готовности  $K_{Г}$  – это вероятность того, что система будет работоспособна в произвольно выбранный момент времени

$$K_{Г} = T_{O} / (T_{O} + t_{B}) \quad (1)$$

где  $t_{B}$  – среднее время восстановления работоспособного состояния.  $T_{O}$  – средняя наработка на отказ (MTBF), т.е. среднее время между отказами, определяется как

$$T_{O} = 1 / \Lambda \quad (2)$$

где  $\Lambda$  – интенсивность отказов всей системы.

Коэффициент вынужденного простоя (коэффициент неготовности)  $K_P$  - это вероятность того, что система не будет работать в произвольно выбранное время

$$K_P = 1 - K_G \quad (3)$$

Использование формулы (1) связано с возможностью расчета включенных в нее параметров: среднего времени между отказами и среднего времени восстановления рабочего состояния. Хотя производитель сам определяет среднее время между отказами для отдельных компонентов, время восстановления зависит от многих конкретных условий эксплуатации. Коэффициент готовности ( $K_G$ ) отдельных компонентов и сети связи в целом различен, но взаимосвязан. Следовательно, если надежность (коэффициент готовности) компонентов системы низкая, то надежность всей системы будет ниже, чем при использовании более надежных компонентов [2].

Поскольку современные системы связи используют для передачи в основном цифровую информацию, для оценки надежности ее эксплуатации можно воспользоваться критерием, связанным со способностью системы выполнять эту функцию с заданным качеством. Универсальным методом оценки качества цифровой системы связи в соответствии с рекомендациями является коэффициент ошибок ( $BER$ ), определяемый как отношение количества  $N_{ош}$  ошибочно принятых битов к общему количеству  $N$  переданных битов:

$$BER = N_{ош}/N \quad (4)$$

Международным комитетом по электросвязи рекомендовано использовать следующие критерии качества работы системы связи.

Норма  $BER < 10^{-10}$ .

Пониженное качество  $10^{-10} < BER < 10^{-6}$ .

Повреждение  $10^{-6} < BER < 10^{-3}$ .

Отказ  $BER > 10^{-3}$ .

Как обычно в нормальных условиях система не может функционировать с частотой ошибок  $BER > 10^{-3}$ , этот критерий можно использовать в качестве критерия неработоспособного состояния системы. Следовательно, при таком уровне ошибок система автоматически выключает оборудование. Отсюда следует, что эти критерии носят рекомендательный характер и для каждой конкретной системы должны определяться в соответствии с условиями ее функционирования [4].

Одним из важных параметров надежности является частота отказов  $\xi$ , которая численно равна среднему числу отказов в час, связанному со значением этого временного интервала. При нормальной работе (после выгорания, но до физического износа) частота отказов остается неизменной. В рассматриваемом

случае  $T_0 = 1/\xi$ , и вероятность того, что объект будет работать безотказно в течение времени  $t$ , равна

$$Q = \exp(-\xi \cdot t) \quad (5)$$

Надежность канала оценивается по следующим показателям: среднее время наработки на отказ, коэффициент готовности (время простоя). Расчет ведется отдельно для ЛКС и оборудования.

Одной из основных проблем долговечности ВОЛС является интенсивность старения элементов кабельной трассы (оптоволоконна и муфт), так как это влияет на протекание массы отказов на линии. Другие факторы будут в основном влиять на долговечность ВОЛС, а также на долговечность традиционных кабельных линий.

На графике (рис. 1) сплошными линиями показаны зависимости минимального срока службы оптоволоконна, прошедших перемотку, от отношения  $\sigma_{пер}/\sigma_{экс}$  при  $n=20$ ,  $V=10^{-3}$  ГПа с и усилиях при перемотке  $P_{пер} = 0,5$  (кривая 1) и 1,5 кг (кривая 2). Как следует из графика, для обеспечения 25-летнего срока службы оптоволоконна необходимо, чтобы эксплуатационное напряжение на оптоволоконно было в 6 – 7 раз меньше напряжения перемотки.

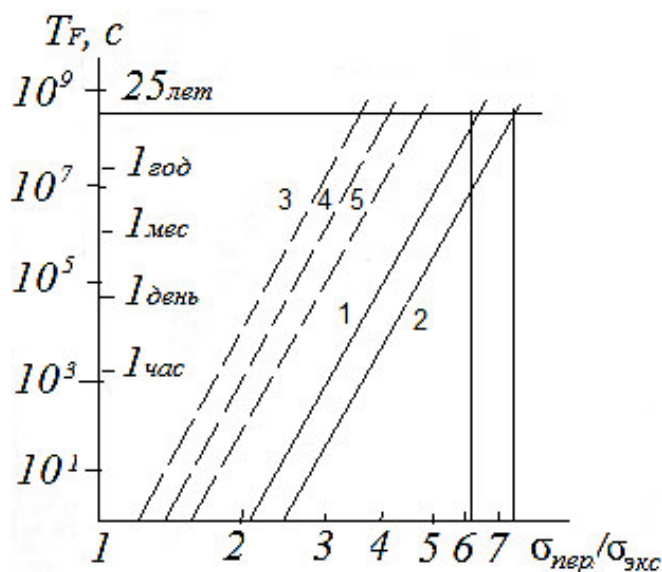


Рисунок 1 – График зависимости срока службы оптоволоконна, прошедших перемотку, от отношения  $\sigma_{пер}/\sigma_{экс}$  при коррозионном процессе разрушения

Допуская возможность разрушения оптоволоконна с определенной вероятностью, можно снизить требования к испытательной нагрузке при перемотке. В этом случае срок службы волокна определяется по формуле

$$T_P = \tau_{пер} \left( \sigma_{пер} / \sigma_{экс} \right)^n \left\{ \left[ 1 - \ln(1-F) / (N_{пер} L) \right]^{\frac{n-2}{r}} - 1 \right\} \quad (7)$$

где  $\tau_{пер}$  – время нахождения оптоволокна под нагрузкой при перемотке;  $F$  – вероятность обрыва оптоволокна до истечения срока службы;  $N_{пер}$  – среднее число обрывов оптоволокна на единицу длины при перемотке под нагрузкой  $\sigma_{пер}$ ;  $r$  – степень наклона функции кумулятивной опасности обрыва при значениях нагрузки, близких к  $\sigma_{пер}$ ;  $L$  – длина оптоволокна. К примеру, при  $\sigma_{пер}=400$  Мпа,  $\sigma_{экс}=100$  Мпа,  $n=20$ ,  $r=10$ ,  $N_{пер} = 0,5$  1/км,  $L=1$  км,  $F=10^{-4}$ ,  $\tau_{пер}=2$  с, срок службы = 25 лет.

Из графика на рис. 1 следует, что за 25 лет разрушится не более 1% оптоволокон длиной 1 км, если отношение напряжения, действующего при перемотке, к рабочему напряжению будет равно трем. Если это отношение равно четырем, то за 25 лет следует ожидать обрыва не более 0,01% оптоволокон километровой длины.

Подводя итоги оценки надежности ВОЛС, следует отметить, что эти отношения  $\sigma_{пер}/\sigma_{экс}$  были учтены для вероятности обрыва только одного километра оптического волокна. Как ожидается, для волоконно-оптической линии длиной 100 км вероятность обрыва оптоволокна из-за старения в результате коррозии будет намного выше:

$$F_{ВОЛС}=1 - pL, \quad (8)$$

где  $p$  – вероятность целостности 1 км оптического волокна.

В заключение стоит отметить, что достоверность любой рассчитанной надежности зависит от надежности отдельных параметров, включенных в соответствующие уравнения. Надежность может быть улучшена по мере накопления информации об эксплуатационных данных. Более эффективным для этой цели является использование автоматизированных систем мониторинга состояния (RFTS), которые содержат встроенные базы данных, заполняемые автоматически.

#### Список литературы

1. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2 – Проектирование, строительство и техническая эксплуатация / Под ред. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 424 с.: ил.

2. Султанов, А. Х. Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А. Х. Султанов, Р. Г. Усманов, И. А. Шарифғалиев, И. Л. Виноградова. – М.: Радио и связь, 2005. – 373 с.

3. Портнов, Э. Л. Оптические кабели связи их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов / Э. Л. Портнов. – М.: Горячая линия-телеком, 2012. – 488 с.: ил.

4. Мильков, А. В. Оценка надежности оптического волокна на основе испытаний на кратковременную прочность и статическую усталость / А. В. Мильков, М. Я. Яковлев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2002 – №1-2 – С. 86–90.

5. Салтыков, А. Р. Повышение эффективности систем мониторинга ВОЛП / А. Р. Салтыков, В. Б. Рудницкий // Фотон-Экспресс. – 2011. – №5(93). – С. 16–17.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Назаров Абдулазиз Муминович**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (71) 245-79-99.

E-mail: nazarov\_58@rambler.ru

##### **Очиллов Бобир Халимбоевич**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (93) 541-59-00.

E-mail: ochilov\_bobir@rambler.ru

##### **Хасанов Миркомил Мирхидоят угли**

Ташкентский государственный технический университет (ТашГТУ).

Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100068, Республика Узбекистан.

Ст. преподаватель кафедры «Радиотехнические

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Nazarov Abdulaziz Muminovich**

Tashkent State Technical University (TSTU).

2, University st., Tashkent, 100068, the Republic of the Uzbekistan.

Dr. Sci. Tech., professor at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

Phone: +998 (71) 245-79-99.

E-mail: nazarov\_58@rambler.ru

##### **Ochilov Bobir Halimboevich**

Tashkent State Technical University (TSTU).

2, University st., Tashkent, 100068, the Republic of the Uzbekistan.

Doctoral student at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

Phone: +998 (93) 541-59-00.

E-mail: ochilov\_bobir@rambler.ru

##### **Khasanov Mirkomil Mirhidoyat ugli**

Tashkent State Technical University (TSTU).

2, University st., Tashkent, 100068, the Republic of the Uzbekistan.

Senior Lecturer at the department “Radio Engineering Devices and Systems” TSTU.

устройства и системы» ТашГТУ.

Тел.: +998 (97) 730-22-65.

E-mail: khasanov.74@list.ru

УДК 629.42:629.4.054, 625.28

Phone: +998 (97) 730-22-65.

E-mail: khasanov.74@list.ru

**О. С. Абляимов, С. М. Азимов, Б. И. Гайратов**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **К ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

*Аннотация.* Рассмотрен метод спектрального анализа огибающей вибрации, который рекомендуется использовать при решении задач мониторинга и функциональной диагностики механизмов роторного действия, включая асинхронные тяговые электродвигатели. Получен спектр сигнала подшипникового узла буксы без дефекта и с дефектом наружного кольца подшипника со стороны тел качения

*Ключевые слова:* виброакустическая диагностика, асинхронный тяговый двигатель, подшипник качения, акселерометр, тензометрический усилитель, спектр, дефект.

**Oleg S. Abyalimov, Sobir M. Azimov, Bahodir I. Gayratov**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET), Tashkent,  
the Republik of Uzbekistan

## **TO DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF ROLLING BEARINGS OF ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC MOTOR**

*Abstract.* The method of spectral analysis of the envelope of vibration is considered, which is recommended to be used when solving problems of monitoring and functional diagnostics of mechanisms of rotor action, including asynchronous traction motors. The signal spectrum of the axle box bearing unit without a defect and with a defect of the outer race of the bearing from the side of the rolling bodies.

*Keywords:* vibroacoustic diagnostics, asynchronous traction motor, rolling bearing, accelerometer, strain gauge amplifier, spectrum, defect.

Развитая транспортная система и её главная составляющая – железнодорожный транспорт являются жизненно необходимыми для Узбекистана в связи с большой плотностью населения, разобщённостью центров промышленности и сельского хозяйства, а также удалённостью от

мировых рынков.

Железнодорожный транспорт работает в тесной взаимосвязи с другими отраслями народного хозяйства Республики Узбекистан, одной из основных задач которого является удовлетворение потребностей экономики в обеспечении своевременными грузовыми и пассажирскими перевозками с учётом безопасной максимально возможной пропускной и провозной способности сети узбекских железных дорог.

В настоящее время, роль современных электровозов и электропоездов в реализации грузовых и пассажирских перевозок на железных дорогах Узбекистана достаточно высока. Это, в свою очередь, влечет за собой осуществлять идеальный контроль над техническим состоянием их узлов, систем и деталей.

Сказанное касается асинхронных тяговых электродвигателей, которые широко используются на железнодорожном транспорте и являются одними из важнейших составляющих экипажной части (колёсно – моторный блок) высокоскоростного электропоезда и современных электровозов.

Асинхронные тяговые электродвигатели обладают высокой надёжностью, простотой конструкции, высокой перегрузочной способностью и высокой эффективностью. Кроме того, по сравнению с электродвигателями постоянного тока, асинхронные электродвигатели более долговечны, дешевле и требуют меньшего обслуживания.

Определение фактического технического состояния узлов и деталей асинхронного тягового электродвигателя позволит организовать его правильную эксплуатацию, своевременное техническое обслуживание и ремонт, и выявлять неисправности на раннем этапе их возникновения.

На сегодняшний день, существует множество методов диагностики асинхронных тяговых электродвигателей в процессе их эксплуатации, которые до сих пор продолжают совершенствоваться, что подтверждает их актуальность и практическую значимость.

Целью данного исследования является решение задачи мониторинга и функциональной диагностики механизмов роторного действия с помощью одного из основных методов вибрационной диагностики - спектрального анализа огибающей вибрации и проведение сравнительного анализа электрических параметров, полученных при этом.

Методы диагностирования подшипников качения работающей машины, основаны на анализе вибрации, создаваемой силами трения в подшипниках.

Специфика сил трения качения во вращающихся узлах машин такова, что при отсутствии дефектов в подшипниках качения они стабильны по времени.

При недостаточной точности изготовления подшипника, его монтажа в посадочном месте, а также при износе поверхности трения, силы трения в этом подшипнике перестают быть стабильными и зависят от угла поворота вращающегося кольца или сепаратора.

Постоянная сила трения возбуждает случайную вибрацию подшипника в широкой полосе частот. Максимум её спектральной плотности обычно приходится на частоты порядка 2 – 10 кГц. Частота спектральной плотности зависит в первую очередь от скорости вращения и размеров подшипника, качества поверхностей трения и смазки. При появлении дефектов а, следовательно, нестабильности силы трения, возбуждаемая случайная вибрация становится нестационарной, то есть величина спектральной плотности на любой частоте периодически изменяется во времени. Именно такое обстоятельство случайной вибрации подшипниковых узлов является объективным признаком появления дефектов трущихся поверхностей в подшипниках качения [1].

Количественные характеристики нестационарной случайной вибрации определяются в результате спектрального анализа огибающей этой вибрации. Обозначенная вибрация представляет собой амплитудную модуляцию высокочастотной вибрации периодическим процессом, например, с периодом вращения узлов подшипника и приводит к тому, что в спектре огибающей, кроме случайных составляющих, появляются еще и гармонические с частотой вращения этих узлов. По частотам появившихся составляющих определяются виды имеющихся в подшипнике дефектов, а по превышению амплитуд этих составляющих над линией фона - глубина каждого из обнаруженных дефектов.

Этот метод анализа сигналов вибрации (метод огибающей) позволяет обнаружить и идентифицировать все основные виды дефектов, определяющих ресурс подшипниковых узлов. Для обнаружения сильно развитых дефектов следует анализировать прямые спектры вибрации [2].

Возможные варианты применения виброакустической диагностики:

- в различных условиях эксплуатации;
- для диагностирования агрегатов, поступающих в ремонт и направляемых после ремонта в эксплуатацию.

Разработанный нами комплекс для виброакустической диагностики выполнен на базе нескольких устройств, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, где обозначено: датчик вибрации (акселерометр), тензометрический усилитель, четырехканальный аналого-цифровой преобразователь, который связан с компьютером по интерфейсу USB.

Обязательным условием использования комплекса является измерение вибрации в контрольных точках на установившемся режиме исследуемого объекта - асинхронного тягового электродвигателя.

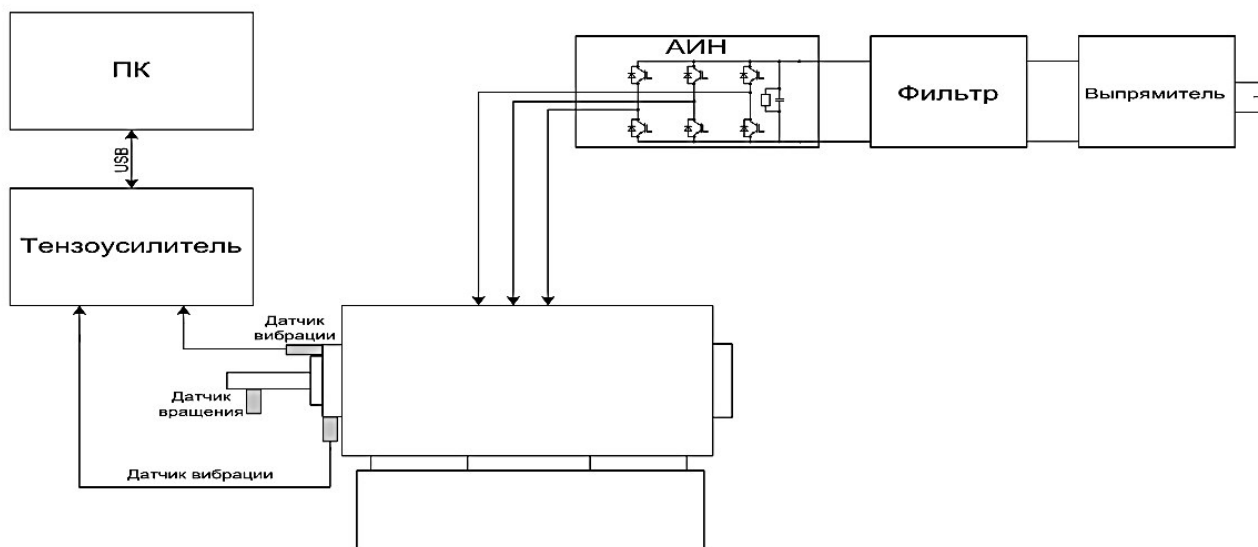


Рисунок 1 – Принципиальная схема комплекса для реализации вибрационной акустической диагностики асинхронного тягового электродвигателя

Ниже приводим технические характеристики основных устройств разработанного нами комплекса для вибрационной акустической диагностики асинхронного тягового электродвигателя

Тензометрический усилитель серии DPM – 700В обладают функциями высокую точности и стабильности измерений деформации, функции автоматического разделение несущий частоты, функции компаратора и сохранения настроек параметров в энергетически зависимой памяти [3].

Количество измерительных каналов – 1.

Соответствующее сопротивление моста – от 50 – 1000 Ом.

Напряжение моста – 2В / 0,5 В переменного тока rms, переключатель.

Сопротивление – в пределах  $\pm 2\%$  ( $\pm 1000$   $\mu\text{м/м}$ ).

Емкостное сопротивление – 2000 pF.

Чувствительность – 0,2 В или больше.

Характеристика передачи – 2-х полюсной фильтр Баттеворта.

Частота отсечки – 6 шагов 10, 30, 100, 1 кГц и F (flat).

Отношение сигнал/шум – 46 дБ или выше.

Габаритная масса – 49 x 128,5 x 262,5 мм (без выступов), около 1.4 кг.

Датчики измерения виброускорения и числа оборотов ротора:

Акселерометры типа ASH-A-100 с предусилителями или им аналогичные.

Датчики частоты вращения ДО – 01; ФД – 02 или им аналогичные по характеристикам.

Характеристики акселерометра ASH-A-100 [4]:

Номинальный выходной сигнал: 0.5mV В (1000x10 – 6 дефор)  $\pm 20\%$  ( $\pm 25\%$  для AS – 10В).

Нелинейность:  $\pm 1\%$ ПШ (полной шкалы).

Гистерезис:  $\pm 1\%$ ПШ.

Входное сопротивление: 120 Ом  $\pm 5\%$ .

Выходное сопротивление: 120 Ом  $\pm 5\%$ .

Рекомендованное питание: 1 ... 3В.

Безопасное питание: 6В.

Поперечная чувствительность:  $\pm 2\%$ .

Температурный диапазон:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент демпфирования:  $\sim 0,64$  (при  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Безопасная перегрузка составляет: 300 процентов.

Кабель: 4-х проводной ( $0,08\text{ мм}^2$ ) виниловый, в экране, длина 5 м и 3,2 м.

Объектом диагностирования при эксперименте является подшипник качения асинхронного тягового электродвигателя. В процессе проведения эксперимента контролировались следующие параметры – составляющие спектров вибрации, создаваемые силами трения в подшипниках. Контрольные точки для измерения – подшипниковые щиты. Питание асинхронного электродвигателя при проведении эксперимента осуществляется от автономного инвертора напряжения.

С помощью разработанной системы диагностирования была проведена экспериментальная оценка технического состояния подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя. Для этого были созданы следующие неисправности: дефект наружного кольца подшипника (углубление в наружном кольце подшипника со стороны тел качения) и дефект тела качения подшипника. Диагностические признаки заданных дефектов, обнаружение и идентификация которых возможна при диагностике подшипников качения, выявлялись по однократным измерениям спектра огибающей вибрации [5].

Вначале был получен вибрационный акустический сигнал исправного объекта, который графически представляется в виде спектра частот вибраций, вызванных работой всего подшипникового узла и показан на рис. 2.

Если узел (подшипник) полностью исправен, правильно собран и сбалансирован (идеальный случай), то в спектре вибрационного акустического сигнала будут содержаться только частоты колебаний, вызванные вращательным движением деталей узлов этого механизма, то есть оборотные.

При наличии дефекта в узле амплитуда сигнала возрастает, а в спектре колебаний появятся дополнительные гармонические составляющие, которые будут характеризовать этот дефект [6].

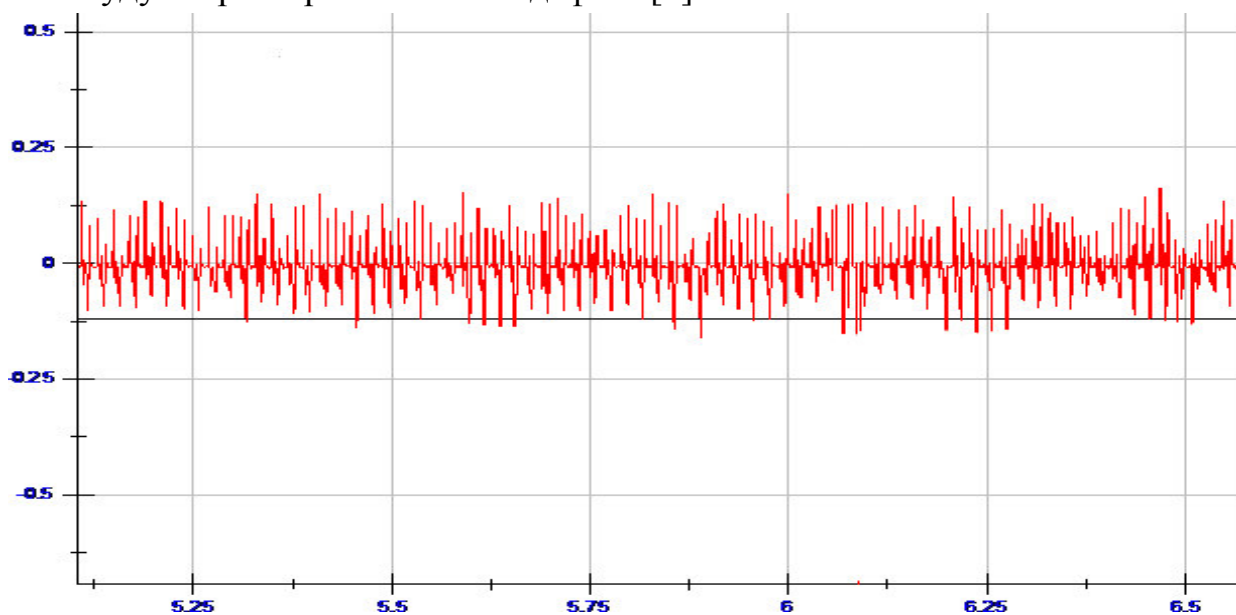


Рисунок 2 – Спектр сигнала подшипникового узла буксы без дефекта

Дефект наружного кольца подшипника приводит к появлению коротких ударных импульсов при контакте каждого тела качения с раковинной (трещиной). В результате появляется ряд гармоник с повторяющимися частотами в спектре огибающей высокочастотной вибрации, причём число этих гармоник достаточно велико, а их амплитуда слабо снижается с ростом (см. рис. 3).

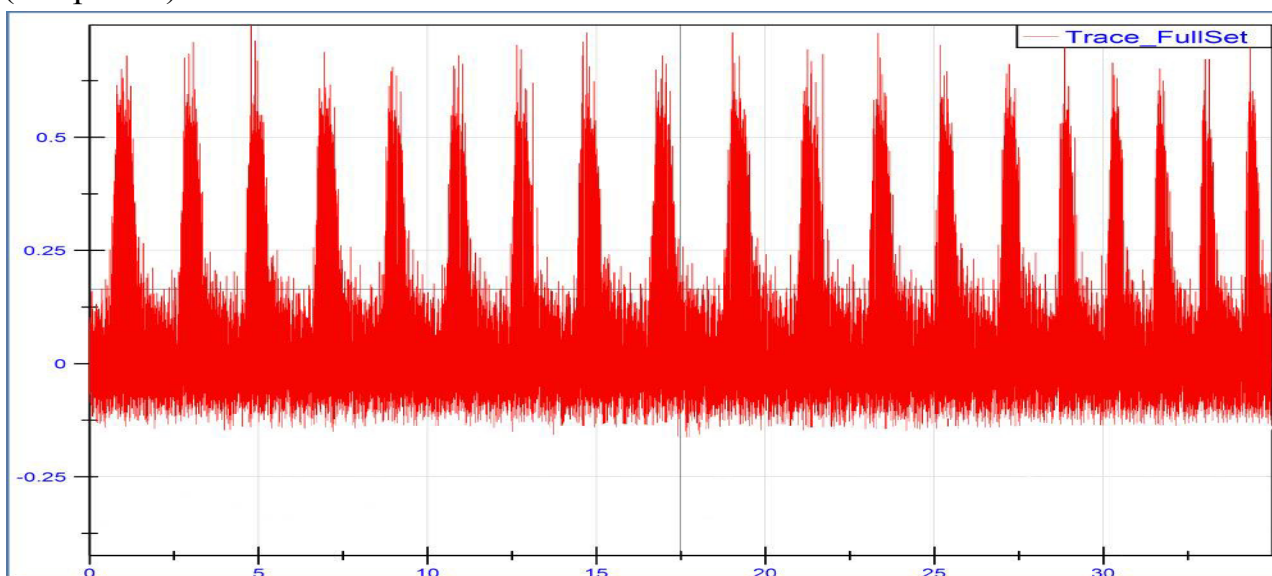


Рисунок 3 – Спектр огибающей вибрации при дефекте наружного кольца подшипника со стороны тел качения

Таким образом, используемый метод вибрационной диагностики подшипниковых узлов асинхронных тяговых электродвигателей позволит проводить оценку и прогноз фактического технического состояния механических узлов, что повысит качество обслуживания их и сокращение общего простоя высокоскоростных электропоездов и современных электровозов в различных условиях эксплуатации.

#### Список литературы

1. Баркова, Н. А. Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации / Н. А. Баркова // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – Ассоциация ВАСТ. 2002. – №15.
2. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М., 1996.
3. Барков, А. В. Современное состояние технических средств анализа вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, П. П. Якобсон. – Ассоциация ВАСТ, 2003.
4. Барков, А. В. Вибродиагностические системы ассоциации ВАСТ. Основа для перевода вращающегося оборудования на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию / А.В. Барков. – Ассоциация ВАСТ, 2004.
5. Сидельников, Л. Г. Контроль технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л. Г. Сидельников, Д. О. Афанасьев. – Пермский национальный исследовательский политехнический университет.
6. Сивокобыленко, В. Ф. Диагностика асинхронного электропривода по данным измерений рабочего режима / В. Ф. Сивокобыленко, Д. В. Полковниченко, К. А. Кукуй. – Донецкий национальный технический университет.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аблялимов Олег Сергеевич**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник, и.о. профессора  
кафедры «Локомотивы и локомотивное  
хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ablyalimov Oleg Sergeyevich**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,  
the Republic of Uzbekistan.  
Doctor of philosophy, chief scientific  
worker, acting professor of the chair  
«Locomotives and locomotive economy»,  
TashIET.  
Phone: +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

**Азимов Собир Махматмирза ўгли**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Кадырова, д. 10, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Магистр, ассистент кафедры «Локомотивы  
и локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99897-439-63-63.  
E-mail: azimovsss@mail.ru

**Azimov Sobir Maxmatmirza ug'li**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
10, Kadyrova str, Tashkent, 100167,  
the Republik of Uzbekistan.  
Master, assistant of the chair «Locomotives and  
locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99897-439-63-63.  
E-mail: azimovsss@mail.ru

**Гайратов Баходир Икболжон ўгли**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Адилходжаева, д. 1, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Студент 3-го курса Электромеханического  
факультета по кафедре «Локомотивы и  
локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99897-262-07-11.  
E-mail: bgayratoff@gmail.com

**Gayratov Bahodir Ikboljon ug'li**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
1, Adilhodjaeva str., Tashkent, 100167,  
the Republik of Uzbekistan.  
Student of 3 courses of the Electromechanical  
department by of the chair «Locomotives and  
locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99897-262-07-11.  
E-mail: bgayratoff@gmail.com

УДК 629.42:629.4.054, 625.28

**О. С. Абляимов, Ж. Д. Ходжиев, Б. И. Гайратов**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ СКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

*Аннотация.* Приведена оценка эффективности использования тормозных систем для скоростного подвижного состава методом численного интегрирования путём решения тормозной задачи при экстренном торможении, алгоритм реализации которой предусматривает проведение расчёта табличным способом. Получена динамика длины тормозного пути скоростного подвижного состава в зависимости от разной величины тормозного коэффициента поезда с учётом заданной скорости начала торможения. Дётся обоснование целесообразности совместного использования дискового и магниторельсового тормоза для обеспечения и повышения условий гарантированной безопасности при движении скоростных и высокоскоростных поездов в пути следования.

*Ключевые слова:* исследование, результат, торможение, тормозной путь, скорость, расчёт, подвижной состав, дисковый тормоз, магниторельсовый тормоз.

## **ANALYSIS OF BRAKE SYSTEM EFFICIENCY SPEED MOBILE COMPOSITION**

***Abstract.** The estimation of the efficiency of using brake systems for high-speed rolling stock by numerical integration by solving the braking problem during emergency braking is presented, the implementation algorithm of which provides for tabular calculation. The dynamics of the braking distance of high-speed rolling stock is obtained depending on the different values of the braking coefficient of the train, taking into account the set braking start speed. The substantiation of the feasibility of joint use of the disk and magneto-rail brakes is provided to ensure and increase the conditions for guaranteed safety when moving high-speed and high-speed trains along the route.*

***Keywords:** research, result, braking, braking distances, speed, calculation, rolling - stock, disk brake, magnetic rail brake*

Высокий уровень производительности действующих и вновь строящихся железных дорог напрямую связан не только с повсеместным увеличением объёма перевозок, сокращением времени доставки грузов и пассажиров, но и от эффективной работы тягового подвижного состава. Обеспечение последней достигается за счёт увеличения скорости движения существующего подвижного состава, внедрения в эксплуатацию новых скоростных и высокоскоростных поездов. При этом рост скоростей движения поездов, в свою очередь, требует соответствующего повышения эффективности использования тормозных систем [1,2] всех видов и типов.

Движение скоростных и высокоскоростных поездов необходимо организовывать при существующей расстановке сигналов, которые "рассчитаны" на значительно меньшую скорость движения. Решением этой задачи является ввод в эксплуатацию систем, которые обеспечивают высокую эффективность торможения поезда без увеличения, реализуемого в процессе торможения, коэффициента сцепления колёс с рельсами.

В настоящее время, несомненно, особое значение имеет решение профильных специализированных задач, связанных с вопросами повышения эффективности использования тормозных систем на всех типах участков железных дорог, которые успешно решаются вводом в эксплуатацию дисковых, магниторельсовых и вихретоковых систем торможения.

Исследования по обоснованию основных показателей систем торможения поездов и повышению эффективности использования их на реальных,

действующих, единицах современного скоростного подвижного состава являются своевременными и актуальными задачами для железных дорог стран ближнего и дальнего зарубежья, в том числе и узбекских железных дорог.

Оценка эффективности тормозных систем осуществляется с помощью решения тормозной задачи для единицы подвижного состава по заданным значениям посредством определения длины тормозного пути поезда при экстренном торможении [3].

Решения этой задачи проводится методом численного интегрирования [4,5], последовательность (алгоритм) которого обозначена в табл. 1 и расшифровывается ниже.

В 1-й графе указывают интервалы времени  $\Delta t = 3$  с, а в 3-й графе – суммарное время торможения  $\Sigma t$ , с.

В 5-й графе задаётся расчётный тормозной коэффициент поезда  $\vartheta_{рч}$  для чугунных колодок:

$$\vartheta_{рч} = \Sigma K_{рч} / (P+Q) \cdot g, \text{ кН/кН} \quad (1)$$

где  $\Sigma K_{рч}$  – суммарное расчётное нажатие чугунных тормозных колодок, кН;  $P$  – масса локомотива, т;  $Q$  – масса состава, т;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

В 6-й графе указывается расчётный коэффициент трения чугунных колодок  $\varphi_{крч}$  о колёса колёсной пары единицы подвижного состава, который определяется по такой формуле:

$$\varphi_{крч} = 0,27 \cdot (V+100) / (5V+100), \quad (2)$$

где  $V$  – скорость движения подвижного состава, км/ч.

В 7-й графе указывается удельная тормозная сила поезда для чугунных колодок  $b_{тч}$ , которая рассчитывается по формуле:

$$b_{тч} = 1000 \cdot \vartheta_{рч} \cdot \varphi_{крч}, \text{ Н/кН} \quad (3)$$

В 8-й графе задаётся расчётный тормозной коэффициент поезда  $\vartheta_{рк}$  для композиционных колодок:

$$\vartheta_{рк} = \Sigma K_{рк} / (P+Q) \cdot g, \text{ кН/кН} \quad (4)$$

где  $\Sigma K_{рк}$  – суммарное расчётное нажатие композиционных тормозных колодок, кН;

В 9-й графе указывается расчётный коэффициент трения композиционных колодок  $\varphi_{крк}$  о колёса колёсной пары единицы подвижного состава, который определяется по следующей формуле:

$$\varphi_{крк} = 0,36 \cdot (V+150) / (2V+150), \quad (5)$$

где  $V$  – скорость движения подвижного состава, км/ч

В 10-й графе указывается удельная тормозная сила поезда для композиционных колодок  $b_{тк}$ , которая рассчитывается по формуле:

$$b_{тк} = 1000 \cdot \vartheta_{рк} \cdot \varphi_{крк} \quad (6)$$



В 12-й графе указывается удельное основное сопротивление движению локомотива на холостом ходу  $w_x'$ , определяющееся так:

$$w_x' = 2,4 + 0,009 \cdot V_{cp} + 0,00035 \cdot V_{cp}^2 \quad (7)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость движения единицы подвижного состава, км/ч.

В 13-й графе указывается удельное основное сопротивление движению вагона  $w_0''$ , определяющееся по формуле:

$$w_0'' = 0,997 + 0,0386 \cdot V_{cp} + 0,0001618 \cdot V_{cp}^2 \quad (8)$$

Удельное основное сопротивление поезда  $w_{ox}$  на холостом ходу рассчитывается с учётом массы его и указывается в 14-й графе:

$$w_{ox} = (w_x' \cdot P + w_0'' \cdot Q) / (P + Q), \text{ Н/кН} \quad (9)$$

В 15-й графе задаётся величина уклона (спуска), ‰; а 16-я графа – полная удельная замедляющая сила  $c$ , которая находится суммированием удельной тормозной силы поезда  $b_T$ , удельного основного сопротивления движению поезда  $w_{ox}$  на холостом ходу с учётом удельной силы от величины уклона  $i_c$  на пути торможения:

$$c = b_T + w_{ox} + i_c, \text{ Н/кН} \quad (10)$$

Начальная и конечная скорости задаются в 17-й и 18-й графах, соответственно, а 19-я графа – есть изменение скорости  $\Delta V$  в интервале  $\Delta t$ , которое определяется по следующей формуле:

$$\Delta V = [\xi \cdot (b_T + w_x' + i_c) \cdot \Delta t] / 3600, \text{ км/ч} \quad (11)$$

где  $\xi$  – действительное (фактическое) ускорение, с которым движется поезд под действием удельной замедляющей силы в 1 Н/кН, км/ч<sup>2</sup>.

Величина действительного (фактического) ускорение  $\xi$  выбирается в зависимости от единицы подвижного состава, значения которой приведены в [3,6].

Средняя скорость  $V_{cp}$  по приращению скорости  $\Delta V$  в принятом интервале времени  $\Delta t$  указывается в 20-й графе.

В 21-й графе указывается приращение тормозного пути  $\Delta S_t$  поезда в интервале времени  $\Delta t$ :

$$\Delta S_t = (\Delta t \cdot V_{cp}) / 3,6, \text{ м} \quad (12)$$

Затем, суммированием всех значений  $\Delta S_t$  находится полный тормозной путь  $S_t$  поезда, который указывается в 22-й графе.

На рис. 1 изображены графики длины тормозного пути единицы подвижного состава  $S_T$  в зависимости от различного значения тормозного коэффициента поезда  $\vartheta$  в принятом диапазоне варьирования его величиной от 0,4 Н/кН до 1,2 Н/кН при заданной скорости начала торможения.

Из графика видно, что в процессе движения скоростных и высокоскоростных поездов использование колодочного и дискового тормоза

при экстренном торможении недостаточно, так как длина тормозного пути подвижного состава существенно превышает норматив на установленную величину длины тормозного пути [4].

Анализ результата решения этой задачи позволил нам сформулировать тезис – для организации и обеспечения безопасного движения скоростных и высокоскоростных поездов в пути следования необходимо использование магниторельсового и дискового тормоза в комбинированном, совместном, сочетании.

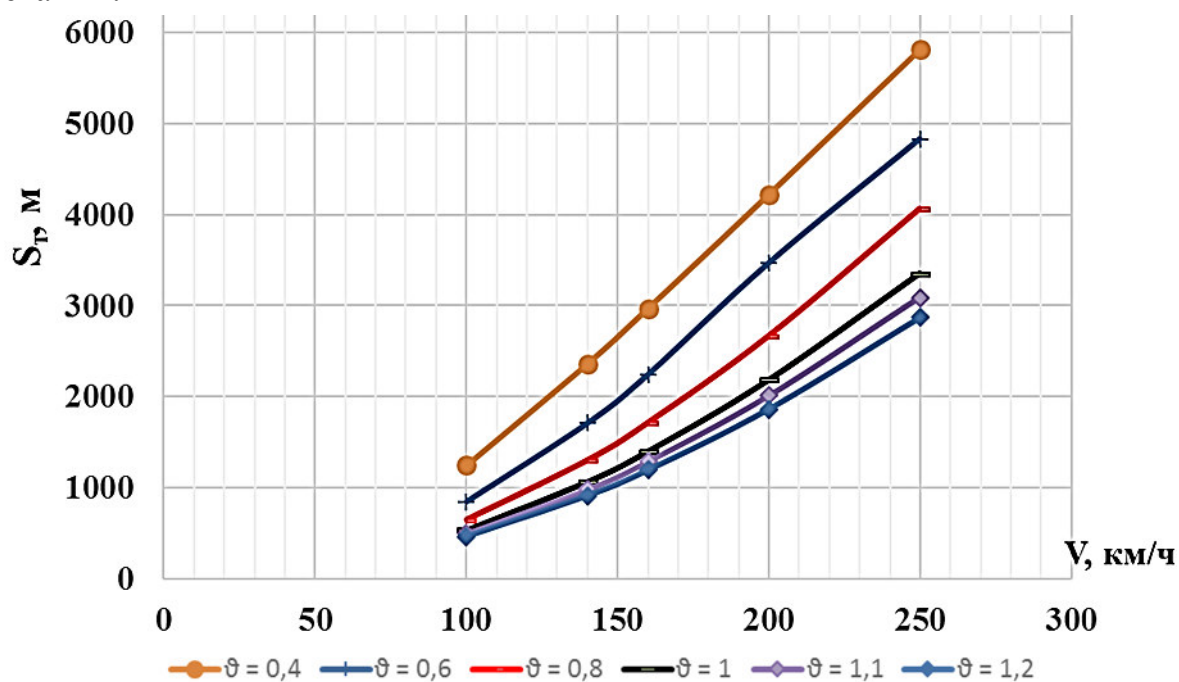


Рисунок 1 – Динамика длины тормозного пути единицы подвижного состава в зависимости от величины тормозного коэффициента поезда

Подтверждением сказанному является использование на современных скоростных и высокоскоростных поездах нескольких систем торможения, каждая из которых имеет свою область применения в определённом диапазоне изменения скоростей движения. Например, скоростной электропоезд «Невский экспресс» [7] оборудован несколькими системами торможения, а именно: колесно – колодочным пневматическим тормозом; электрическим реостатным тормозом с самовозбуждением; электропневматическим колесно - колодочным тормозом; дисковым тормозом; магниторельсовым тормозом; ручным тормозом для удержания поезда на месте. Для управления автоматическими тормозами в кабине машиниста контроллер машиниста имеет дополнительно ещё четыре тормозных положения, благодаря которым организовывается безопасное сочетание нескольких систем торможения при эксплуатации поезда.

## Список литературы

1. Казаринов, В. М. Теоретические основы проектирования и эксплуатации автотормозов [Текст] / В. М. Казаринов, В. Г. Иноземцев, В. Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1968. – 399 с.
2. Иноземцев, В. Г. Автоматические тормоза [Текст] / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1981. – 464 с.
3. Аблялимов, О. С. Основы управления локомотивов: Учебник для профессиональных колледжей железнодорожного транспорта [Текст] / О. С. Аблялимов, Э. С. Ушаков. – Ташкент: «Davt», 2012. – 392 с.
4. Гребенюк, П. Т. Правила тормозных расчётов [Текст] / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. – Москва: Интекст, 2004. – 112 с.
5. ГОСТ Р 55434 - 2013. Электропоезда. Общие технические требования (с Поправкой). Введ. 2012 – 12 – 19. - Москва: Стандартинформ, 2013. – 36 с.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://locomo.ru/podvizhnoy-sostav/raschet-tormozov-2.html> (дата обращения: 01.10.2019).
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.net> (дата обращения: 03.10.2019).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **Аблялимов Олег Сергеевич**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, и.о. профессора кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

#### **Ходжиев Жасур Джура ўғли**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Мирзы Турсунзаде, д. 50, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.  
Ассистент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99899-868-63-85.  
E-mail: jassergeli\_94@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Ablyalimov Oleg Sergeevich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,  
the Republik of Uzbekistan.  
Doctor of philosophy, chief scientific worker, acting professor of the chair «Locomotives and locomotive economy», TashIET.  
Phone: +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

#### **Khodjiyev Jasur Djura ug'li**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
50, Tursunzade str., Tashkent, 100167,  
the Republik of Uzbekistan.  
Assistant of the chair «Locomotives and locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99899-868-63-85.  
E-mail: jassergeli\_94@mail.ru

**Гайратов Баходир Икболжон ўғли**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Адилходжаева, д. 1, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Студент 3-го курса Электромеханического  
факультета по кафедре «Локомотивы и  
локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
+99897-262-07-11.  
E-mail: bgayratoff@gmail.com

**Gayratov Bahodir Ikboljon ug'li**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
1, Adilhodjaeva str., Tashkent, 100167,  
the Republik of Uzbekistan.  
Student of 3 courses of the Electromechanical  
department by of the chair «Locomotives and  
locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99897-262-07-11.  
E-mail: bgayratoff@gmail.com

УДК 629.42:629.4.054, 625.28

**О. С. Абляимов, А. А. Мавлонов, С. М. Гултораев**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОЗОВ ЗТЭ10М НА УЧАСТКЕ КАТТАКУРГАН – НАВОИ УЗБЕКСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

*Аннотация.* Представлены результаты обоснования параметров перевозочной работы трёхсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов ЗТЭ10М на холмисто - горном участке железной дороги при разных видах движения грузовых поездов и оценки тягового качества профиля пути этого участка. Результаты исследований получены при помощи методов и способов теории локомотивной тяги в виде табличных данных и графических зависимостей.

*Ключевые слова:* исследование, результат, грузовой поезд, тепловоз, железная дорога, эффективность, разъезд, анализ, станция, холмисто-горный, топливо.

**Oleg S. Abyalimov, Adhamjon A. Mavlonov, Sardor M. Gultoraev**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET), Tashkent, the Republik of Uzbekistan

## **ESTIMATION OF EFFICIENCY OF TRANSPORTATION WORK OF ЗТЕ10М DIESEL LOCOMOTIVES ON KATTAKURGAN - NAVOI SECTION OF UZBEK RAILWAY**

*Abstract.* Introduced the results of validation three - sectional of main (trains) freight of the ЗТЕ10М diesel locomotives of transportation working parameters on a hilly – mountainous of railway district by of different elevations of freight trains movement and of estimation of the traction qualities of the track profile of this district. Research of the results received by the help of methods and fashions of theory of locomotive tractions in the form of tabular dates and graphic arts dependences.

*Keywords:* research, result, the freight train, the diesel locomotive, railway, efficiency, the

*stage, analysis, the station, hilly – mountainous, fuel.*

На магистральные (поездные) грузовые локомотивы дизельной тяги приходится пятьдесят четыре процента всех секций локомотивного парка АО «Ўзбекистон темир йўллари» [1], их которых приблизительно семьдесят процентов секций составляют тепловозы серии ТЭ10М.

Целью теоретических исследований является обоснование кинематических параметров движения грузовых поездов и параметров основных показателей использования магистральных (поездных) грузовых тепловозов серии ТЭ10М на одном из участков узбекских железных дорог, а также оценка тягового качества и трудности профиля пути этого участка.

В основе настоящего исследования лежат методы и способы [1,2] теории локомотивной тяги и реальные условия организации перевозочного процесса грузовых поездов с массой состава  $Q = 2500$  т и постоянным числом осей равным  $m = 200$  осей на спрямлённом, заданном, железнодорожном профиле пути, объект и предмет исследований [3].

Объект исследования составляют трёхсекционные магистральные (поездные) грузовые тепловозы 3ТЭ10М и спрямлённый профиль пути реального участка Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари», имеющий четыре железнодорожных перегона: перегоны Каттакурган – Разъезд № 28, Разъезд № 28 – Зирабулак, Зирабулак – Зиёвуддин, и Зиёвуддин – Навои.

Предмет исследования - кинематические параметры движения грузовых поездов и основные показатели топливо - энергетической эффективности использования упомянутых грузовых тепловозов 3ТЭ10М с учётом приведённого расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов в количественном и денежном исчислении на заданном, реальном, участке железной дороги.

Для реализации железнодорожных перевозок грузов и технологии (режимов) ведения грузовых поездов на холмисто – горном участке Каттакурган – Навои используются магистральные локомотивы дизельной тяги, – трёхсекционные магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии 3ТЭ10М, конструктивная особенность которых описана в [4]. Характеристика элементов спрямлённого профиля пути и ограничения скоростей движения на перегонах железнодорожного участка Каттакурган – Навои приведена в [5].

Критерием (показателем) оценки тягового качества профиля пути железнодорожных участков, то есть трудности его, являются [6,7] приведённые значения общего и удельного расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов.

Дополнительно необходимо учитывать следующие приведённые и удельные значения параметров основных показателей перевозочной работы локомотивов дизельной тяги:  $t^*$  – приведённое время хода поезда в режиме тяги,  $e$  – удельный расход натурального дизельного топлива и  $ст$  - удельные затраты денежных средств на тягу поездов.

В табл. 1 и табл. 2 приведены значения некоторых кинематических параметров движения грузовых поездов по каждому перегону участка Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари» без остановок и с остановками на разъездах, промежуточных станциях и отдельных пунктах.

Таблица 1

Время хода грузового поезда по перегонам без остановок, а по разъездам, промежуточным станциям и отдельным пунктам на замедление - разгон

№ п/п	Промежуточные Станции	Расстояние, км	Время хода, мин	Время на замедление / разгон, мин
1	Каттакурган	-	-	1,70/0,90
2	Разъезд № 28	11,25	10,70	1,25/0,70
3	Зирабулак	16,85	14,80	1,90/1,40
4	Зиёвуддин	27,15	19,50	1,90/2,00
5	Навои	23,50	16,90	1,60/-
6	Каттакурган - Навои	78,75	61,90	1,67/1,25

Таблица 2

Кинематические параметры движения грузового поезда по перегонам участка Каттакурган - Навои, тепловозы 3ТЭ10М

Перегоны	Техническая скорость движения $V_T$ , км/ч	Время хода поезда (без остановок / с остановками), мин		
		по перегону	в режиме	
			тяги	холостого хода и торможения
Каттакурган – Разъезд № 28	63,19/58,29	10,70/11,60	3,60/4,80	7,10/6,80
Разъезд № 28 - Зирабулак	71,52/63,38	14,80/16,70	8,30/8,10	6,50/8,60
Зирабулак - Зиёвуддин	82,24/72,57	19,50/22,10	5,90/6,40	13,60/15,70
Зиёвуддин - Навои	84,12/74,44	16,90/19,10	5,25/7,50	11,65/11,60
Каттакурган - Навои	76,90/68,49	61,90/69,50	23,05/26,8	38,85/42,70

Анализ данных табл. 1 и табл. 2 говорит о том, что движение грузовых поездов на исследуемом участке железной дороги, организованное без

остановок на разъездах, промежуточных станциях и отдельных пунктах по отношению к движению с остановками на них, способствует:

- уменьшению общего времени хода поезда на 7,6 мин и увеличению технической скорости движения на 8,41 км/ч при среднем расчётном времени на одну остановку в 2,92 минуты;

- значениям долей движения в режимах тяги в 37,24 процента, а холостого хода и торможения в 62,76 процента;

- уменьшению доли движения на режимах тяги и увеличение доли движения холостого хода и торможения, приблизительно, на 1,32 процента.

Динамика изменения кинематических параметров и кривых скоростей движения грузовых поездов по каждому перегону и исследуемому участку Каттакурган – Навои, в целом, свидетельствует об отсутствии движения с равномерной скоростью.

В табл. 3 приведены значения общего (полного) и удельного расхода натурального дизельного топлива в количественном и денежном исчислении, затрачиваемое исследуемыми тепловозами 3ТЭ10М при реализации движения грузового поезда с массой  $Q = 2500$  т и постоянным числом осей  $m = 200$  осей в составе по кажущемуся Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Таблица 3

Энергетические показатели эффективности использования тепловозов 3ТЭ10М на холмисто – горном участке Каттакурган – Навои

Перегоны	На промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах							
	без остановок				с остановками			
	общий (полный) за поездку E, кг	удельный за поездку e, кг/10 <sup>4</sup> ткм брутто	полные денежные затраты C <sub>т</sub> , тыс. сўм	удельные денежные затраты c <sub>т</sub> , тыс. сўм/км	общий (полный) за поездку E, кг	удельный за поездку e, кг/10 <sup>4</sup> ткм брутто	полные денежные затраты C <sub>т</sub> , тыс. сўм	удельные денежные затраты c <sub>т</sub> , тыс. сўм/км
Каттакурган – Разъезд № 28	98,814	35,07	174,94	15,524	128,71	45,69	227,87	20,221
Разъезд № 28 - Зирабулак	216,57	49,11	383,43	21,735	213,92	48,51	378,73	21,469
Зирабулак - Зиёвуддин	164,18	24,57	290,67	10,874	179,18	26,81	317,23	11,868
Зиёвуддин - Навои	145,58	24,58	257,74	10,878	202,22	34,14	358,02	15,111
Каттакурган - Навои	625,15	31,52	1106,8	13,951	724,04	36,51	1281,9	16,158

Анализ результата этого этапа исследований установил следующее:

- усреднённое расчётное время движения грузового поезда без остановок для каждого перегона и суммарное на разгон - замедление по промежуточным станциям, разъездам и раздельным пунктам составляет, соответственно, приблизительно 15,47 и 2,92 минуты;

- усреднённое расчётное время движения грузового поезда для каждого перегона с остановками на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах составляет приблизительно 17,37 минуты;

- движение грузовых поездов без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах, по сравнению с аналогичным движением с остановками на последних, способствует снижению расхода натурального дизельного топлива приблизительно на 13,66 процента;

- расход натурального дизельного топлива для одной остановки на разъездах, промежуточных станциях и раздельных пунктах составляет приблизительно 32,96 кг/ост, а на один разгон – замедление он равен 33,65 кг;

- удельный расход натурального дизельного топлива на одну остановку составляет приблизительно 1,66 кг /10<sup>4</sup> т км брутто;

- усреднённая величина общего (полного) и удельного расхода натурального дизельного топлива для каждого перегона участка, соответственно, составляет 156,29 кг и 7,88 кг/10<sup>4</sup> т км брутто – движение без остановок и 181,01 кг и 9,13 кг/10<sup>4</sup> т км брутто – движение с остановками на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах;

- среднее значение усреднённой величины общего (полного) и удельного расходов натурального дизельного топлива для двух (обоих) видов движения на каждом перегоне участка, соответственно, составляет приблизительно 168,65 кг и 8,49 кг/10<sup>4</sup> т км брутто;

- усреднённая величина полных и удельных затрат денежных средств для каждого перегона участка, соответственно, составляет 320,47 тыс. сўм и 4,039 тыс. сўм / км – движение с остановками и 276,700 тыс. сўм и 3,488 тыс. сўм / км – движение без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах;

- среднее значение усреднённой величины полных и удельных затрат денежных средств для двух (обоих) видов движения на каждом перегоне участка составляет приблизительно 298,585 тыс. сўм и 3,789 тыс. сўм / км.

На рис. 1 и рис. 2 показан характер изменения параметров критерия трудности и сложности профиля пути каждого перегона исследуемого участка АО «Ўзбекистон темир йўллари» и других основных показателей перевозочной работы трёхсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов серии

ЗТЭ10М, сопутствующих железнодорожным перевозкам разных по структуре и содержанию грузов.

По оси ординат обозначено: расход натурального дизельного топлива за поездку, соответственно, приведённый общий (полный)  $E^*$ , приведённый удельный  $e^*$  и удельный  $e$ , приведённое время хода поезда в режиме тяги  $t_T^*$  и удельные затраты денежных средств  $c_T$ .

На рис. 1 и рис. 2 величина приведённого времени хода поезда в режиме тяги  $t_T^*$  увеличена в семьдесят раз, а на рис. 2 величина приведённого удельного расхода  $e^*$  натурального дизельного топлива увеличена в десять раз.



Рисунок 1 – Графики показателей перевозочной работы тепловозов ЗТЭ10М на участке Каттакурган – Навои, движение без остановок

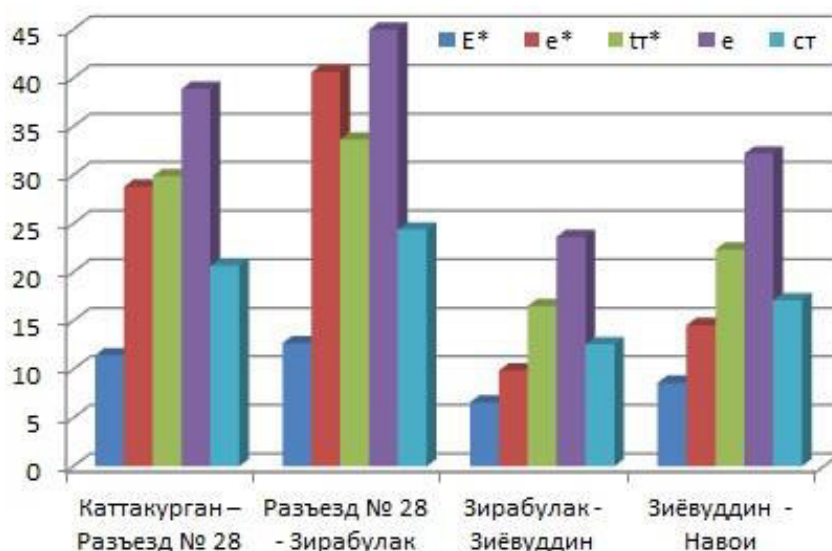


Рисунок 2 – Гистограмма показателей перевозочной работы тепловозов ЗТЭ10М на участке Каттакурган – Навои, движение с остановками

Величина приведённого общего (полного)  $E^*$  и удельного  $e^*$  расхода натурального дизельного топлива, то есть  $(E^*, \text{ кг}) / (e^*, \text{ кг}/10^4 \text{ т км брутто: км})$ , по каждому перегону участка Каттакурган - Навои, составляет:

- на перегоне Разъезд № 28 – Зирабулак – 12,853 / 3,117 единиц – движение без остановок и 12,695/ 4,060 единиц – движение с остановками на разъездах, промежуточных станциях и отдельных пунктах;

- по перегону Каттакурган - Разъезд. № 28 – 8,783 / 2,914 и 11,44 / 2,879 единиц, соответственно, при движении без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах;

- на двух перегонах Зирабулак - Зиёвуддин и Зиёвуддин – Навои происходит изменение от 6,599 / 0,987 до 8,605 / 1,453 единиц – движение с остановками и от 6,047 / 0,905 до 6,195 / 1,046 единиц движение – движение без остановок на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Таким образом, динамика значений приведённого общего (полного)  $E^*$  и удельного  $e^*$  расхода натурального дизельного топлива для исследуемых грузовых тепловозов 3ТЭ10М свидетельствует, что наиболее трудным является перегон Разъезд № 28 – Зирабулак, перегон Каттакурган - Разъезд № 28 – средний по трудности, а два других перегона Зирабулак – Зиёвуддин и Зиёвуддин – Навои относятся к лёгким.

Сопоставление значений кинематических параметров и показателей эффективности перевозочной работы трёхсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов серии 3ТЭ10М с аналогичными значениями по работам [5-7 и другие] показало достаточно высокую сходимость.

Упомянутые кинематические параметры и показатели энергетической эффективности использования могут характеризовать перевозочный процесс в реальных условиях организации железнодорожных перевозок грузов на исследуемом участке Каттакурган – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Результаты исследований рекомендуются для практического использования специалистам локомотивного комплекса, профессиональная и производственная деятельность которых связана с вопросами нормирования и прогнозирования расхода и экономии топливно - энергетических ресурсов на тягу поездов, а также с энергетикой движения грузовых поездов в процессе организации железнодорожных перевозок грузов на реальных холмисто – горных участках узбекских железных дорог.

#### Список литературы

1. Деев, В. В. Тяга поездов: Учебное пособие для вузов [Текст] / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М.: Транспорт, 1987. – 264 с.

2. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.

3. Аблялимов, О. С. Исследование эффективности использования локомотивной тяги на холмисто - горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Аблялимов // Научно – технический журнал «Вестник транспорта Поволжья» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2017. – № 1 (61). – С. 15 – 24.

4. Аблялимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто – горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Аблялимов // Научно – технический журнал «Известия Транссиба» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 2 (26) – С. 2–10.

5. Аблялимов, О. С. Исследование эффективности перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М и тяговые качества профиля пути участка Мароканд – Навои в условиях эксплуатации [Текст] / О. С. Аблялимов // Сборник материалов I-й международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы – 2017» (TIS-2017) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт – Петербург, 2017. – С. 150 – 161.

6. Ablyalimov, O. S. The profile track traction qualities of section Marokand-Navoi railway section of «Uzbekistan railways» JSC railways by diesel traction [Text] / O. S. Ablyalimov // Республиканская научно - техническая конференция с участием зарубежных учёных «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Ташкент, 2016. – С. 34 – 37.

7. Ablyalimov, O. S. The profile track traction qualities of Marokand-Navoi railway district of Uzbek railways by diesel locomotive operation [Text] / O. S. Ablyalimov, M. I. Khismatulin // Республиканская научно - техническая конференция «Транспортная логистика. Мультимодальные перевозки» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Ташкент, 2017. – С. 17 – 20.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

### **Аблялимов Олег Сергеевич**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,  
Республика Узбекистан.  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, и.о. профессора кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

### **Ablyalimov Oleg Sergeyevich**

Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).  
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,  
the Republic of Uzbekistan.  
Doctor of philosophy, chief scientific worker, acting professor of the chair «Locomotives and locomotive economy», TashIET.  
Phone: +99890-975-59-43.  
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

**Мавлонов Адхамжон Ахмаджоноич**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
Юнусабд - 10, д. 1 - 71, г. Ташкент, 100052,  
Республика Узбекистан.  
Студент Электромеханического факультета  
по кафедре «Локомотивы и локомотивное  
хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. +99897-130-96-99.  
E-mail: adxammaa@gmail.com

**Гултораев Сардор Муратжанович**  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта (ТашИИТ).  
ул. Элбек, д. 26 кв. 2, г. Ташкент, 100052.  
Республика Узбекистан.  
Студент Электромеханического факультета  
по кафедре «Локомотивы и локомотивное  
хозяйство» ТашИИТ.  
Тел. + 99890-910-76-66.  
E-mail: punish1994s@gmail.com

**Mavlonov Adhamjon Amadjonovich**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
71 - 1, 10 - Yunusabad, Tashkent, 100052,  
the Republik of Uzbekistan.  
The student of the Electromechanical  
department by of the chair «Locomotives and  
locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99897-130-96-99.  
E-mail: adxammaa@gmail.com

**Gultoraev Sardor Muratjanovich**  
Tashkent institute of railway transport  
engineering (TashIET).  
26 - 2, Elbek, Tashkent, 100052,  
the Republik of Uzbekistan.  
The student of the of the Electromechanical  
department by of the chair «Locomotives and  
locomotive economy» TashIET.  
Phone: +99890-910-76-66.  
E-mail: punish1994s@gmail.com

*Научное издание*

«НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ,  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ»

Материалы всероссийской научно-технической конференции  
(25 октября 2019 г.)

---

Ответственный за выпуск Е. В. Пономарев

\* \* \*

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 05.11.2019. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ .  
Плоская печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 14,53 Уч.-изд. л. 11,53.  
Тираж 300 экз. Заказ

\* \*

Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35