



ISSN 2949-0693

# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 1 • 2023

INNOVATIVE INSTRUMENTATION



ГУАП





**ГУАП**

Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
аэрокосмического  
приборостроения

# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 1 • 2023

# INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 2, no. 1 • 2023



**SUAI**

Saint Petersburg  
State University  
of Aerospace  
Instrumentation

### Innovative Instrumentation

Founded in 2022

#### Founder

Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Publisher

Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Chief Editor

E. A. Frolova,  
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,  
Director at the Institute of Fundamental  
Training and Technological Innovation,  
Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,  
PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor

#### Executive Secretary

V. A. Tushavin,  
D. Sc. in Technical Sciences

#### Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.  
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.  
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.  
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.  
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.  
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.  
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.  
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.  
V. A. Tushavin, D. Sc.  
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.  
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.  
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

### Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for  
Supervision of Communications, Information Technology  
and Mass Media (Roskomnadzor),  
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

#### Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion  
materials; its content does not necessarily reflect  
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal  
"Innovative Instrumentation" to foreign editions  
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"  
is mandatory.

#### Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,  
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,  
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation  
Tel.: (812) 494-70-69  
E-mail: ip@guap.ru  
Website: <https://guap.ru/inps>

#### Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.  
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.  
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member  
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.  
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.  
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician  
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician  
V. I. Shevchenko, D. Sc.  
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor *V. A. Chernikova*  
Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 22.02.2023. Signed for printing: 28.02.2023. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,  
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

### Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

#### Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Главный редактор

Е. А. Фролова,  
доктор технических наук, доцент,  
директор института фундаментальной  
подготовки и технологических инноваций,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,  
кандидат технических наук, доцент

#### Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,  
доктор технических наук

#### Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.  
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.  
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.  
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.  
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.  
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.  
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.  
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.  
В. А. Тушавин, д-р техн. наук  
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.  
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

### Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.  
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496  
от 24.06.2022 – печатное издание)

#### Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных  
материалов; его содержание не обязательно  
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное  
приборостроение» в зарубежные издания допускается  
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»  
обязательна.

#### Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»,  
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А  
Тел.: (812) 494-70-69  
E-mail: ip@guap.ru  
Сайт: <https://guap.ru/inps>

#### Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.  
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН  
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.  
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН  
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН  
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук  
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*

Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 22.02.2023. Дата выхода в свет: 28.02.2023. Формат 60 × 84 1/8.  
Уч.-изд. л. 14,3. Усл. печ. л. 13,6. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 52.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП  
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

## О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СММИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.



## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами новый номер журнала «Инновационное приборостроение».

«Инновационное приборостроение» – междисциплинарное научное издание, выпускаемое с целью оперативного информирования научной общественности о достижениях в области отечественного и мирового приборостроения; освещения результатов научных исследований, разработок и инновационной деятельности отраслевой, вузовской и академической науки; расширения, углубления и повышения качества подготовки кадров высшей квалификации в области приборостроения; обеспечения профессионального диалога между его авторами и читателями и выявления потенциала для прорывных инноваций, а также отражения связанной проблематики, носящей мультидисциплинарный характер.

Для меня, главного редактора журнала, самой важной в нем является научная составляющая. Это, в первую очередь, строгие научные знания, актуальность, практическая значимость и технически грамотный стиль изложения.

Все статьи, вошедшие в этот номер, можно условно разделить на два блока. Первый – статьи, посвященные практическому применению математических методов, инфокоммуникационных технологий и средств искусственного интеллекта для решения задач инновационного приборостроения. Второй блок – статьи, в которых излагаются результаты решения задач фундаментальной науки и прикладных исследований, способствующие общему техническому прогрессу в приборостроении.

Редакция журнала выражает благодарность всем членам редакционной коллегии, авторам и рецензентам за активное участие в становлении нашего издания. В ближайших планах редакции – продолжение развития журнала, повышение его авторитета, соз-



дание электронной библиотеки статей, посвященных развитию отечественного инновационного приборостроения, вхождение в базы цитирований и многое другое.

Приятного вам прочтения!

**Главный редактор**  
**Елена Александровна Фролова**  
доктор технических наук, доцент,  
директор института фундаментальной  
подготовки и технологических  
инноваций ГУАП

## Сравнительный анализ сигналов, используемых в многоканальных системах радиосвязи

**Евгений Александрович Антохин<sup>1</sup>**

✉ fresguap@mail.ru

**Сергей Викторович Дворников<sup>1, 2</sup>**

practicdsv@yandex.ru

**Александр Роальдович Бестугин<sup>1</sup>**

fresguap@mail.ru

**Ирина Анатольевна Киршина<sup>1</sup>**

ikirshina@mail.ru

**Сергей Сергеевич Дворников<sup>1, 2</sup>**

dvornik92@gmail.com

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Приведены результаты исследования сигналов дифференциальной квадратурной фазовой модуляции и частотной модуляции с минимальным сдвигом по показателям спектральной эффективности и помехоустойчивости их приема при когерентной обработке. Рассмотрены особенности применения разделения каналов в зависимости от используемого диапазона частот. Обоснованы пути снижения негативных последствий при переходе к ограниченной полосе частот радиоканала в многоканальных системах радиосвязи. Предложен выбор вида модуляции сигнала исходя из обеспечения минимальной занимаемой полосы частот при сохранении допустимого уровня энергетических потерь при приеме. Представлен аналитический аппарат оценки спектральной эффективности сигнальных конструкций. Демонстрируются результаты сравнительной оценки спектральной эффективности сигналов дифференциальной квадратурной фазовой модуляции и частотной модуляции с минимальным сдвигом при различных ограничениях в спектральном пространстве. Дана сравнительная оценка скорости спада уровня энергетических составляющих в спектре в зависимости от контролируемой полосы. Проведено сравнение результатов оценки помехоустойчивости когерентного приема сигналов дифференциальной квадратурной фазовой модуляции и частотной модуляции с минимальным сдвигом по показателю значения корреляционного интеграла, рассчитываемого для фрагментов, определяющих противоположные информационные символы. Сформулированы направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** спектральная эффективность сигналов, помехоустойчивость приема, способы уплотнения каналов, сигналы частотной модуляции с минимальным сдвигом, сигналы дифференциальной квадратурной фазовой модуляции

**Для цитирования:** Антохин Е. А., Дворников С. В., Бестугин А. Р., Киршина И. А., Дворников С. С. Сравнительный анализ сигналов, используемых в многоканальных системах радиосвязи // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 6–14. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-6-14.

Original article

## Comparative analysis of signals used in multichannel radio communication systems

**Evgeny A. Antokhin<sup>1</sup>**

✉ fresguap@mail.ru

**Sergey V. Dvornikov<sup>1, 2</sup>**

practicdsv@yandex.ru

**Alexander R. Bestugin<sup>1</sup>**

fresguap@mail.ru

**Irina A. Kirshina<sup>1</sup>**

ikirshina@mail.ru

**Sergey S. Dvornikov<sup>1,2</sup>**

dvornik92@gmail.com

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The results of the study of signals of differential quadrature phase modulation and frequency modulation with a minimum shift in terms of spectral efficiency and noise immunity of their reception during coherent processing are presented. The features of the use of channel separation depending on the used frequency range are considered. The ways of reducing the negative consequences during the transition to a limited frequency band of the radio channel in multichannel radio communication systems are substantiated. The choice of the type of signal modulation is proposed, based on ensuring the minimum occupied frequency band while maintaining an acceptable level of energy loss during reception. An analytical apparatus for estimating the spectral efficiency of signal structures is presented. The results of a comparative evaluation of the spectral efficiency of signals of differential quadrature phase modulation and frequency modulation with a minimum shift under various constraints in the spectral space are demonstrated. The results of a comparative assessment of the rate of decline in the level of energy components in the spectrum, depending on the controlled band, are presented. A comparison has been made of the results of the assessment of the noise immunity of the coherent reception of differential quadrature phase modulation and frequency modulation signals with a minimum shift in the value of the correlation integral calculated for the fragments defining the opposite information symbols. Directions for further researches are formulated.

**Keywords:** spectral efficiency of signals, noise immunity of reception, channel multiplexing methods, frequency modulation signals with minimum shift, differential quadrature phase modulation signals

**For citation:** Antokhin E. A., Dvornikov S. V., Bestugin A. R., Kirshina I. A., Dvornikov S. S. Comparative analysis of signals used in multichannel radio communication systems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):6–14. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-6-14.

## Введение

Многоканальные системы радиосвязи (МКСР) активно используются в сетях радиодоступа (СРД), организуемых в интересах связи мобильных абонентов с базовыми станциями или стационарными узлами [1, 2]. Наиболее широкое распространение СРД получили в системах мобильной и транкинговой связи [3].

Вместе с тем, несмотря на их достаточно бурное развитие, ограниченность частотного диапазона приводит к необходимости поиска конструктивных решений, позволяющих найти компромисс между качеством предоставляемых услуг МКСР и числом потенциально возможных абонентов, использующих ее ресурсы. Указанные обстоятельства стимулируют поиск новых технических и научных подходов, обеспечивающих достижение требуемых результатов.

Один из таких подходов связан с разработкой спектрально-эффективных сигналов [4], способных обеспечить высокую помехоустойчивость приема [5].

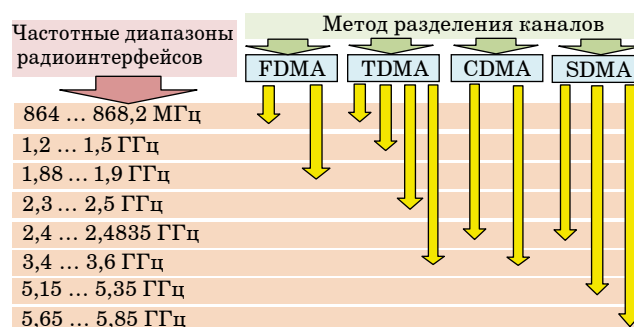
В настоящей статье представлены результаты исследования спектральной эффективности и помехоустойчивости сигналов дифференциальной квадратурной фазовой модуляции со сдвигом символов  $\pi/4$  (Differential Quadrature Phase Modulation with symbol shift  $\pi/4$ ,  $\pi/4$ -DQPSK) [6] и частотной модуляции с минимальным сдвигом (Minimum-Shift Keying, MSK) [7] в рамках их использования в МКСР.

## Анализ особенностей использования частотного ресурса

Особенностью МКСР, применяемых в СРД, является использование для предоставления услуг

связи достаточно широкого диапазона частот, который разделяют на каналы посредством реализации различных методов [8]: частотного разделения – Frequency Division Multiple Access (FDMA); временного разделения – Time Division Multiple Access (TDMA); кодового разделения – Code-Division Multiple Access (CDMA); пространственного разделения – Space-Division Multiple Access (SDMA). Данные методы достаточно глубоко проработаны и активно реализуются на практике. Среди особенностей их реализации следует выделить привязку к конкретным диапазонам частот, определяемую параметрами конкретных радиointерфейсов, которая характеризуется так называемым «национальным распределением» частотного ресурса [9]. На рис. 1 показано распределение методов доступа к каналам по диапазонам частот для радиointерфейсов цифровых систем.

Согласно данным рис. 1, метод FDMA радиointерфейсов цифровых систем наиболее активно используется в нижней части частотного диапа-



• Рис. 1. Применение методов распределения каналов по диапазонам частот

• Fig. 1. Application of methods for channel distribution by frequency bands



зона. При этом для аналоговых систем в диапазоне от 30 до 900 МГц также преимущественно используется метод FDMA.

В частности, метод FDMA реализован во всех стандартах сотовой связи [10], начиная от Nordic Mobile Telephone (NMT), Global System for Mobile Communications (GSM), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) и заканчивая Long Term Evolution (LTE); в СРД Worldwide Interoperability for Microwave Access Mobile (WIMAX).

Заметим, что именно для технологии FDMA спектральная эффективность сигналов играет наиболее важную роль, поскольку она обеспечивает требуемую энергетическую развязку между каналами [11]. Данный аспект получил особую значимость с переходом на технологию 6,25 кГц FDMA [12], согласно которой, все радиостанции, работающие в диапазонах частот 150...174 и 421...512 МГц, в обязательном порядке должны содержать каналы с полосой 6,25 кГц. В табл. 1 приведены общие сведения о цифровых стандартах, использующих технологию FDMA.

В целях снижения негативных последствий при переходе к ограниченной полосе частот в МКСП применяют различные меры:

- модуляционные форматы с низким уровнем побочных излучений [4];
- увеличение объема канального алфавита при сохранении скорости передачи, в частности, за счет перехода к перестановочной модуляции [13];
- дополнительное сглаживание сигналов в целях снижения внеполосных спектральных составляющих [14];
- переход к спектрально-эффективным способам кодирования [15] и др.

Учитывая, что применение указанных мер имеет свою специфику, необходимо проанализировать их особенности.

Так, согласно [16], наиболее активно технологии FDMA применяют в системах персонального

- Таблица 1. Основные параметры стандартов, использующих технологию FDMA
- Table 1. Main parameters of standards using FDMA technology

Стандарт	APCO P25	Tetrapol	dPMR
DMO/ транкинговая связь	Доступны обе технологии	Транкинговая	DMO
Диапазон	VHF/UHF/800	UHF	UHF
Ширина канала, кГц	25/12,5	12,5/10	6,25

Примечание: DMO (Direct Mode Operation) – режим прямой передачи между абонентами.

радиовызова; СРД; стандартов сотовой связи; цифрового телевизионного вещания.

Важнейшими параметрами для МКСП являются [16]:

- 1) ширина полосы занимаемых частот;
- 2) вид модуляции сигналов в пределах каждого из субканалов;
- 3) способы формирования и обработки сигналов.

Основной задачей МКСП является частотно-пространственная локализация каналов путем их уплотнения в пределах одного общего радиоканала.

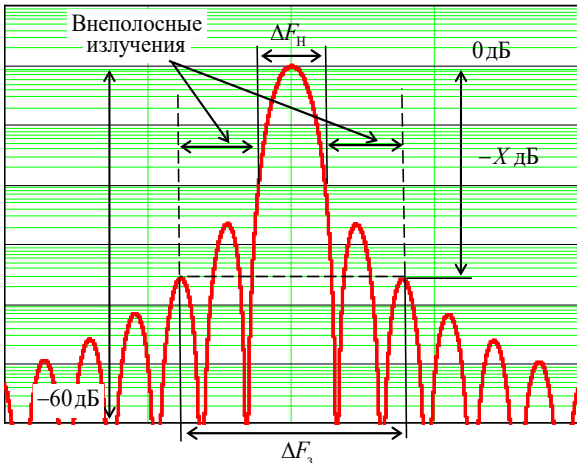
Задача уплотнения абонентских каналов решается на малых уровнях мощности и на промежуточных частотах. В результате возникает сложный сигнал (составленный из элементарных сигналов абонентских каналов), который поступает в модулятор передатчика. При этом расширение полосы частот, занимаемой спектром, и усложнение формы сигнала как функции времени зависят от метода уплотнения [17].

Так, при частотном уплотнении частотные полосы спектров абонентских сигналов не пересекаются на частотной оси, поскольку абонентские каналы объединяются посредством частотно-избирательных (частотно-разделительных) устройств. В этом случае распределение сигналов или пользователей по диапазону частот является долгосрочным или постоянным. Такой подход позволяет снизить интерференцию между соседними (по частоте) каналами [18].

Очевидно, что при выборе вида сигнала необходимо исходить из обеспечения минимальной занимаемой полосы частот при сохранении допустимого уровня энергетических потерь при приеме [19]. При этом важно не допустить ухудшения их взаимнокорреляционных свойств.

Именно поэтому в FDMA оперируют такими понятиями, как «необходимая  $\Delta F_H$ » и «занимаемая  $\Delta F_3$ » полосы частот спектрами сигналов, которые определяются уровнем внеполосных излучений. И если  $\Delta F_H$  характеризует минимально допустимую полосу частот, достаточную для передачи сигналов определенного класса с требуемыми скоростью и качеством [20], то величина  $\Delta F_3$  определяет реальную полосу частот, занимаемую излучением. Границы величин  $\Delta F_H$  и  $\Delta F_3$  показаны на рис. 2.

Для численной оценки рассмотренных показателей вводят понятие ограничительного уровня, который ниже исходного на  $X$  дБ, как правило, максимального уровня спектральной плотности мощности, принятого за 0 дБ [21]. Тогда нижним уровнем измеряемой мощности излучения определим  $-60$  дБ. Заметим, что во многих случаях важно не только сузить полосу частот, например, эквивалентную полосу  $\Delta F_g$  или полосу по уровню 99 % зна-



• Рис. 2. Границы, определяющие уровень внеполосных излучений и значимой полосы частот

• Fig. 2. Boundaries defining the level of out-of-band emissions and the significant frequency band

чимой мощности  $\Delta F_{99\%}$ , но и обеспечить достаточно малый уровень внеполосных излучений [22].

Применительно к узкополосным сигналам, используемым в МКСП (центральная частота которых удовлетворяет условию  $2\pi f_0 \gg 1/T$ ), значение  $\Delta F_\epsilon$  по уровню  $-60$  дБ будем определять исходя из условия:

$$\epsilon(f_0) = \frac{2 \int_0^{f_0} G(f_0) d(f_0)}{\int_0^\infty G(f_0) d(f_0)}, \quad (1)$$

где  $G(f_0)$  – энергетический спектр.

Для оценки параметров спектральной эффективности необходимо знать закон спада функции огибающей  $G(f_0)$  в пределах значимой полосы частот. Для любого энергетического спектра при большой расстройке значения текущей частоты от центральной  $f - f_0$  функция огибающих его компонент может быть аппроксимирована выражением вида  $G(f) \approx 1/f^{2\nu}$ , где  $2\nu$  – показатель степени, характеризующий скорость спада функции огибающей энергетического спектра [23]. Зная характер ее асимптотического поведения, можно оценить величину  $G(f)$  для любого значения  $f - f_0$ . И, следовательно, использовать данный показатель для оценки спектральной эффективности сигналов.

### Результаты оценки спектральной эффективности сигналов МКСП

При FDMA абонентский сигнал представляет собой радиоимпульс, центральная частота запол-

нения которого равна значению частоты, определяющей номер канала. В таких условиях взаимное влияние сигналов, расположенных на соседних каналах, будет определяться только уровнем их внеполосных излучений. В общем случае компенсация взаимного влияния сигналов соседних каналов возможна или за счет дополнительной фильтрации, или с помощью применения сигналов с высокой крутизной спада спектральных составляющих [24]. Заметим, что любая фильтрация связана со снижением энергетичности излучений, что является нежелательным явлением.

Таким образом, возникает вопрос выбора между сохранением помехоустойчивости или спектральной эффективности. В рамках поиска компромиссных решений рассмотрим сигналы  $\pi/4$ -DQPSK как изначально обладающие высокой помехоустойчивостью приема, и сигналы MSK, характеризующиеся высокими свойствами спектральной эффективности.

Итак, сначала оценим уровни внеполосных излучений сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK. Для сигналов фазовой манипуляции спектральная плотность мощности описывается следующим выражением [22]:

$$G_{\text{PSK}}(v) = 0,5T \frac{\sin^2(2\pi vT)}{(2\pi vT)^2}. \quad (2)$$

Для сигналов MSK формула спектральной плотности мощности имеет следующий вид [15]:

$$G_{\text{MSK}}(v) = \frac{8T}{\pi^2} \frac{(1 + \cos(4\pi v))}{(1 - 16v^2)^2}. \quad (3)$$

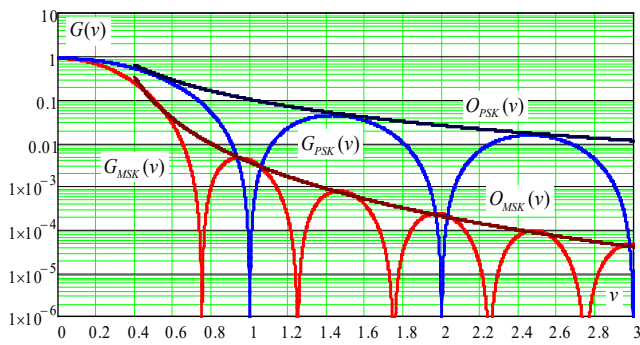
В формулах (2) и (3) величина  $T$  определяет длительность элемента сигнала;  $v = |f - f_0| / f_0$  – величина относительной расстройки по отношению к значению несущей частоты  $f_0$ .

На рис. 3 показаны нормированные значения спектральной плотности мощности сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK, дополнительно показаны функции огибающих спектров сигнала  $\pi/4$ -DQPSK  $O_{\text{PSK}}(v)$  и MSK  $O_{\text{MSK}}(v)$ .

Очевидно, что спектральная компактность сигналов MSK существенно выше, чем у  $\pi/4$ -DQPSK.

В табл. 2–4 приведены результаты оценки спектральной компактности по уровням затухания  $-10$ ,  $-20$  и  $-30$  дБ, полученные по всему спектру, первому «лепестку» спектра, по третьей гармонике.

Анализ полученных результатов показывает, что в условиях отсутствия частотных ограничений полоса спектра сигналов  $\pi/4$ -DQPSK по уровню  $-10$  дБ в 1,44 раза превышает полосу,



• Рис. 3. Нормированные значения функций спектральной плотности мощности сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK  
 • Fig. 3. Normalized values of the power spectral density functions of  $\pi/4$ -DQPSK and MSK signals

• Таблица 2. Значимая полоса частот по всему спектру  
 • Table 2. Significant bandwidth across the entire spectrum

Вид сигнала	Величина частотной расстройки $\nu$ по уровню		
	-10 дБ	-20 дБ	-30 дБ
MSK	0,50	0,65	1,13
$\pi/4$ -DQPSK	0,72	2,65	10,4

• Таблица 3. Значимая полоса частот по первому «лепестку»  
 • Table 3. Significant frequency band for the first «lobe»

Вид сигнала	Величина частотной расстройки $\nu$ по уровню		
	-10 дБ	-20 дБ	-30 дБ
MSK	0,50	0,65	0,71
$\pi/4$ -DQPSK	0,72	0,90	0,97

• Таблица 4. Значимая полоса частот по третьей гармонике  
 • Table 4. Significant third harmonic bandwidth

Вид сигнала	Величина частотной расстройки $\nu$ по уровню частотной расстройки		
	-10 дБ	-20 дБ	-30 дБ
MSK	0,50	0,65	1,13
$\pi/4$ -DQPSK	0,72	1,78	1,94

занимаемую сигналами MSK. По уровню -20 дБ указанные различия достигают уже почти 4,1 раза. По уровню -30 дБ различия достигают значения в 9 раз.

В условиях ограничения по третьей гармонике для уровня -10 дБ полученные результаты аналогичны результатам, рассчитанным для условий без ограничений. По уровню -20 дБ полоса

спектра сигнала  $\pi/4$ -DQPSK в 1,7 раза превышает полосу, занимаемую сигналами MSK. По уровню -30 дБ указанные различия снижаются до величины 1,72 раза.

Наименьшие различия в занимаемой полосе между сигналами  $\pi/4$ -DQPSK и MSK достигаются при ограничениях по первому «лепестку» спектра.

Так, для уровня -10 дБ сохраняются результаты предыдущих расчетов. По уровню -20 дБ сигналы MSK в 1,38 % раза компактнее сигналов  $\pi/4$ -DQPSK. По уровню -30 дБ рассматриваемые различия достигают величины всего 1,28 раза.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что существенный выигрыш по показателю спектральной эффективности сигналы MSK обеспечивают только без мероприятий по фильтрации [25]. В условиях ограничений в пределах первого «лепестка» указанный выигрыш составит всего около 30–40 %.

Теперь рассмотрим помехоустойчивость приема сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK с позиций зависимости вероятности битовой ошибки  $p_b$  в зависимости от величины корреляционного интеграла, рассчитываемого при реализации оптимального когерентного приема на длительности сигнала  $T$  [15, 26]:

$$p_b = \exp\left(\frac{2}{N_0} \int_0^T k(t) dt\right), \quad (4)$$

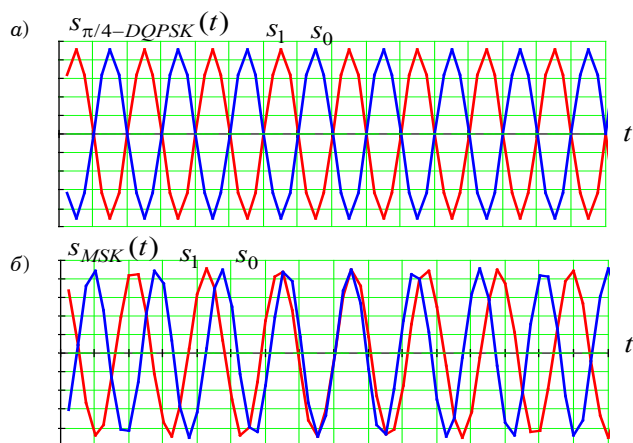
где  $k(t) = s_1(t)s_0(t)$  – корреляционный интеграл;  $s_1(t)$  – сигнал, соответствующий информационному символу «1»;  $s_0(t)$  – сигнал, соответствующий информационному символу «0»;  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума.

Таким образом, результат корреляции  $k(t)$  определяется различием сигналов, соответствующих противоположным информационным символам «1» и «0».

На рис. 4 показаны временные фрагменты сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK, соответствующие противоположным значениям «1» и «0».

Проведенный анализ полученных результатов показал, что различия у сигналов  $\pi/4$ -DQPSK, соответствующих противоположным информационным символам, неизменны на всей длительности элемента сигнала. В то время как у сигналов MSK они вариативны, причем на половине элемента сигнала различия равны нулю. Это подтверждают графики зависимости  $k(t)$  для сигналов  $\pi/4$ -DQPSK и MSK, полученные в соответствии с выражением (4) (рис. 5).

Поскольку помехоустойчивость оптимального когерентного приемника определяется в терминах выражения (4), то целесообразно представить



• Рис. 4. Временные фрагменты сигналов,  $\pi/4$ -DQPSK и MSK, соответствующих противоположным символам

• Fig. 4. Time fragments of signals,  $\pi/4$ -DQPSK and MSK, corresponding opposite characters

соответствующие зависимости  $p(t)$  как функции времени:

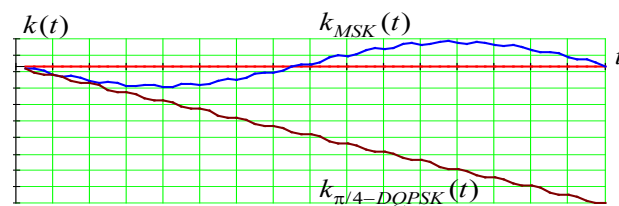
$$p(t) = \exp\left(\int_0^T k(t) dt\right). \quad (5)$$

Результирующие значения зависимости  $p(t)$  как функции времени приведены на рис. 6.

В соответствии с полученными результатами, значение корреляционного интеграла сигнала  $\pi/4$ -DQPSK в 1,28 раза превосходит аналогичное значение для сигналов MSK.

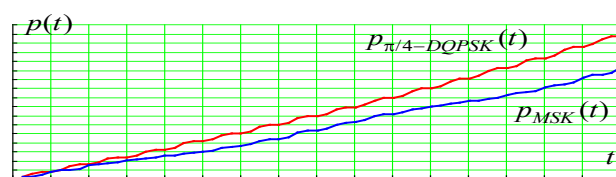
## Заключение

Проведенные исследования показали, что при рассмотрении эффективности сигналов для МКСП по двум показателям – спектральной эффективности и помехоустойчивости – сложно сделать однозначный выбор. Каждый из сигна-



• Рис. 5. Функции корреляции сигналов противоположных символов

• Fig. 5. Signal correlation functions of opposite symbols



• Рис. 6. Зависимости значений корреляции сигналов противоположных символов

• Fig. 6. Dependences of the correlation values of signals of opposite symbols

лов,  $\pi/4$ -DQPSK и MSK, имеет свои достоинства и недостатки. Именно поэтому указанные виды модуляций широко используются в различных стандартах.

Однако следует отметить, что в проведенных исследованиях мы рассматривали только условия когерентного оптимального приема, что достаточно сложно обеспечить на практике. Кроме того, реализация приема сигналов фазовой манипуляции изначально предполагает высокую линейность трактов формирования и приема радиоволн, что, в свою очередь, ведет к увеличению стоимости производства МКСП.

Дальнейшие исследования мы связываем с изучением спектральной эффективности сигналов 4-FSK, применяемых в стандартах DMR [27, 28].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филиппов И. Ф., Паламарчук Д. В. Сравнительный анализ автономного и неавтономного сценариев развертывания сетей радиодоступа 5G // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 77.
2. Зорин А. А., Разумова И. И., Тарков В. А. Многоканальная система цифровой обработки для тепловизионных систем наблюдения // Приклад. физика. 2005. № 2. С. 93–97.
3. Бабин А. И. Математическое моделирование радиотрасс при проектировании транкинговых систем // Фундамент. исслед. 2007. № 12-2. С. 276–278.
4. Крячко М. А., Макаров С. Б., Смирнов С. Н. Применение спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций в задачах ЭМС РЭС // Научно-техн. ведомости Санкт-петерб. гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 2 (55). С. 52–56.
5. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи / Г. В. Куликов, А. А. Лелюх, Е. В. Баталов, П. И. Кузленков // Журн. радиоэлектроники. 2019. № 7. С. 2.

6. Сергиенко А. Б. Повышение спектральной эффективности передачи за счет дифференциальной фазовой манипуляции пилот-сигналов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8, № 1. С. 183–187.
7. Дворников С. В., Дворников С. С. Эмпирический подход к оценке помехоустойчивости сигналов фазовой модуляции // Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19, № 6. С. 1280–1306.
8. Поборуева М. С., Бодров О. А. Особенности и отличия методов разделения каналов FDMA, TDMA и CDMA // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сб. тр. V Междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. / под общ. ред. О. В. Миловзорова. Рязань, 2022. С. 67–72.
9. Харитонов Н. И. Принципы, показатели и критерии целесообразности изменения категорий полос частот в национальной таблице распределения полос частот между радиослужбами РФ // Труды Науч.-исслед. ин-та радио. 2008. № 2. С. 12–22.
10. Ляхов А. Е. FDMA, TDMA, CDMA... Продолжение следует? // Computer Club Magazine. 1999. № 4. С. 67–70.
11. Дворников С. В., Духовницкий О. Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73–77.
12. Введение в технологию цифровых радиосистем многостанционного доступа с частотным разделением, отличающихся малой шириной полосы частот каналов (технология 6,25 кГц FDMA). URL: <https://sicom.ru/images/products/121/fdma.pdf> (дата обращения: 04.11.2022).
13. Дворников С. В., Овчинников Г. Р., Балыков А. А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6–12.
14. Дворников С. В., Яхеев А. Ф. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексева // Информация и космос. 2011. № 1. С. 66–74.
15. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 502 с.
16. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. 5-е изд., испр. М.: Эко-трендз, 1998. 239 с.: ил.
17. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией / С. В. Дворников [и др.] // Информ. технологии. 2017. Т. 23, № 3. С. 193–198.
18. Частотно-временное оценивание параметров сигналов на основе функций огибающих плотности распределения их энергии / С. В. Дворников [и др.] // Информация и космос. 2007. № 4. С. 41–45.
19. Зайцева Ю. М. Методы повышения эффективности использования частотного ресурса в беспроводных широкополосных системах связи // Т-Сопп: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6, № 2. С. 56–58.
20. Интегральная модель помехозащищенных линий радиосвязи / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, С. С. Маенаенко, И. Н. Глухих // Радиопромышленность. 2018. № 4. С. 8–14.
21. Математические модели навигационных сигналов с требуемой формой спектральной плотности мощности / В. В. Неровный, А. В. Журавлев, Т. Ю. Урывская, П. Д. Коратаев // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 7. С. 69–75.
22. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
23. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов / С. В. Дворников [и др.] // Информация и космос. 2015. № 3. С. 13–16.
24. Макаренко С. И. Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях нестабильности входного трафика // Инфокоммуникац. технологии. 2007. Т. 5, № 3. С. 95–96.
25. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации / А. А. Алексеев [и др.] // Науч. приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 65–76.
26. Агеев Ф. И., Вознюк В. В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных противоположных фазоманипулированных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Труды МАИ. 2022. № 124. С. 1–32.
27. Слюняев А. Н., Вериго А. М., Ананьев Д. В. Система цифровом технологическом радиосвязи стандарта DMR // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 1. С. 10–13.
28. Дворников С. В., Пшеничников А. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учеб. завед. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 221–228.

## REFERENCES

1. Filippov I. F., Palamarchuk D. V. Comparative analysis of autonomous and non-autonomous deployment scenarios for 5G radio access networks. Modern problems of radio electronics and telecommunications. 2021;(4):77. (In Russ.).



2. Zorin A. A., Razumova I. I., Tarkov V. A. Multichannel digital processing system for thermal imaging surveillance systems. *Applied Physics*. 2005;(2):93–97. (In Russ.).
3. Babin A. I. Mathematical modeling of radio paths in the design of trunking systems. *Fundamental research*. 2007;(12-2): 276–278. (In Russ.).
4. Kryachko M. A., Makarov S. B., Smirnov S. N. Application of spectrally efficient signals based on atomic functions in the problems of EMC RES. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. *Informatics. Telecommunications. Control*. 2008;(2(55)):52–56. (In Russ.).
5. Kulikov G. V., Lelyukh A. A., Batalov E. V., Kuzelenkov P. I. Noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of phase-shift keying interference. *Journal of Radioelectronics*. 2019;(7):2. (In Russ.).
6. Sergienko A. B. Improving the spectral efficiency of transmission due to differential phase shift keying of pilot signals. *DSPA: Issues in the application of digital signal processing*. 2018;8(1):183–187. (In Russ.).
7. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S. An empirical approach to assessing the noise immunity of phase modulation signals. *Informatics and Automation*. 2020;19(6):1280–1306. (In Russ.).
8. Poborueva M. S., Bodrov O. A. Features and differences between FDMA, TDMA and CDMA channel separation methods. *Modern technologies in science and education – STNO-2022. Proceedings of the V International Scientific and Technical Forum: in 10 vol. / eds by O. V. Milovzorov. Ryazan, 2022, pp. 67–72.* (In Russ.).
9. Kharitonov N. I. Principles, indicators and criteria for the expediency of changing the categories of frequency bands in the national table of allocation of frequency bands between radio services of the Russian Federation. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*. 2008;(2):12–22. (In Russ.).
10. Lyakhov A. E. FDMA, TDMA, CDMA... to be continued?. *Computer Club Magazine*. 1999;(4):67–70. (In Russ.).
11. Dvornikov S. V., Dukhovnitsky O. G. Evaluation of noise immunity of professional radio navigation equipment of the GLONASS system. *Information and space*. 2015;(4):73–77. (In Russ.).
12. Introduction to the technology of digital radio systems of multiple access with frequency division, characterized by a small bandwidth of channels (6.25 kHz FDMA technology). Available from: <https://sicom.ru/images/products/121/fdma.pdf> [Accessed 04 November 2022].
13. Dvornikov S. V., Ovchinnikov G. R., Balykov A. A. Software simulator of the decameter ionospheric radio channel. *Information and space*. 2019;(3):6–12. (In Russ.).
14. Dvornikov S. V., Yaheev A. F. Method for measuring the parameters of short-term signals based on the Alekseev distribution. *Information and space*. 2011;(1):66–74. (In Russ.).
15. Feer K. *Wireless digital communication. Methods of modulation and spread spectrum*. Moscow: Radio and communication; 2000. 502 p. (In Russ.).
16. Gromakov Yu. A. *Mobile radio communication standards and systems*. 5<sup>th</sup> ed. Moscow: Eco-trends; 1998. 239 p. (In Russ.).
17. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Ivanov R. V. et al. Protection from structural interference of radio channels with frequency shift keying. *Information technologies*. 2017;23(3):193–198. (In Russ.).
18. Dvornikov S. V., Borodin E. Yu., Madzhar Kh., Makhluif Yu. Kh. Time-Frequency Estimation of Signal Parameters Based on the Envelope Functions of Their Energy Distribution Density. *Information and Space*. 2007;(4):41–45. (In Russ.).
19. Zaitseva Yu. M. Methods for improving the efficiency of using a frequency resource in wireless broadband communication systems. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 2012;6(2):56–58. (In Russ.).
20. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S., Glukhikh I. N. Integral model of noise-protected radio communication lines. *Radio industry*. 2018;(4):8–14. (In Russ.).
21. Nerovny V. V., Zhuravlev A. V., Uryvskaya T. Yu., Korataev P. D. Mathematical models of navigation signals with the required shape of the power spectral density. *Radiotekhnika*. 2022;86(7):69–75. (In Russ.).
22. Sklyar B. *Digital communication. Theoretical foundations and practical application*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Williams Publishing House; 2003. 1104 p. (In Russ.).
23. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Manaenko S. S. et al. Theoretical provisions for increasing the noise immunity of signal-code structures of quadrature signals. *Information and space*. 2015;(3):13–16. (In Russ.).
24. Makarenko S. I. A method for estimating the packet delay time in a communication channel under conditions of input traffic instability. *Infocommunication technologies*. 2007;5(3):95–96. (In Russ.).
25. Alekseev A. A., Aladinsky V. A., Zheleznyak V. K. et al. Application of methods of frequency-time processing of acoustic signals for the analysis of reverberation parameters. *Nauchnoe priborostroenie*. 2001;11(1):65–76. (In Russ.).
26. Ageev F. I., Voznyuk V. V. Method for calculating the bit error probability of optimal symbol-by-symbol coherent reception of binary opposite phase-shift keyed signals in the presence of narrow-band noise interference in the radio communication channel. *Proceedings of MAI*. 2022;(124):1–32. (In Russ.).

27. Slyunyaev A. N., Verigo A. M., Ananiev D. V. Digital technological radio communication system of the DMR standard. Automation, communication, informatics. 2014;(1):10–13. (In Russ.).
28. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Formation of spectrally efficient signal structures in radio channels of data transmission of control and measuring complexes. Izvestiya of higher educational institutions. Instrumentation. 2017;60(3):221–228. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Антохин Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – радиотехника.

**Дворников Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного.

Область научных интересов – телекоммуникационные технологии.

**Бестугин Александр Роальдович**, доктор технических наук, профессор, директор института радиотехники и инфокоммуникационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – радиолокация, радионавигация.

**Киршина Ирина Анатольевна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – радиолокация, радионавигация.

**Дворников Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного.

Область научных интересов – телекоммуникационные технологии.

**Antokhin Evgeny A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Radio Engineering Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – radio engineering.

**Dvornikov Sergey V.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Professor at the Department of Radio Communication, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny.

Research interests – telecommunication technologies.

**Bestugin Alexander R.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Head at the Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – radiolocation and radio navigation.

**Kirshina Irina A.**, PhD in Economics, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – radiolocation and radio navigation.

**Dvornikov Sergey S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Researcher at the Research Department, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny.

Research interests – telecommunication technologies.

Поступила в редакцию 06.12.2022

Поступила после рецензирования 20.12.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Received 06.12.2022

Revised 20.12.2022

Accepted 30.01.2023

## Методы оценки и устранения узких мест, снижающих пропускную способность мостов SpaceFibre-Ethernet

**Алексей Юрьевич Виноградов<sup>1</sup>**

alexey.vinogradov@guap.ru, orcid.org/0000-0003-2130-9456

**Елена Александровна Суворова<sup>1</sup>**

✉wildcat15@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-6330-8182

**Алексей Юрьевич Сыщиков<sup>1</sup>**

alexey.syschikov@guap.ru, orcid.org/0000-0003-3484-6533

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Стандарт SpaceFibre был разработан специально для бортовых вычислительных сетей с учетом их требований и особенностей. Однако, поскольку данный стандарт был разработан совсем недавно, существует большое количество оборудования, не имеющего данного интерфейса, которое необходимо подключать к сетям SpaceFibre. Актуальной задачей является подключение к сети SpaceFibre персонального компьютера (ПК). ПК может использоваться в целях отладки, генерации тестовых потоков данных, мониторинга работы сети. Большинство современных ПК имеют интерфейс Ethernet. В данной статье предлагается протокол Eth-SpFi 1.0, предназначенный для решения этой задачи. Представлены вариант аппаратной реализации протокола и математическая модель для оценки характеристик передачи данных, достижимых при использовании этого протокола. С использованием этих моделей выполнена оценка характеристик, определены рекомендованные значения параметров, влияющих на достижимые характеристики.

**Ключевые слова:** сеть Ethernet, сеть SpaceFibre, аппаратная реализация протокола, математическая модель протокола, оценка характеристик протокола

**Для цитирования:** Виноградов А. Ю., Суворова Е. А., Сыщиков А. Ю. Методы оценки и устранения узких мест, снижающих пропускную способность мостов SpaceFibre-Ethernet // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 15–24. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-15-24.

Original article

## Methods for detecting and eliminating bottlenecks that reduce the bandwidth of SpaceFibre-Ethernet bridges

**Alexey Yu. Vinogradov<sup>1</sup>**

alexey.vinogradov@guap.ru, orcid.org/0000-0003-2130-9456

**Elena A. Suvorova<sup>1</sup>**

✉wildcat15@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-6330-8182

**Alexey Yu. Syschikov<sup>1</sup>**

alexey.syschikov@guap.ru, orcid.org/0000-0003-3484-6533

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The SpaceFibre standard was developed specifically for on-board local networks, taking into account their requirements and features. However, since this standard was developed quite recently, there is a large number of equipment that does not have this interface but that needs to be connected to SpaceFibre networks. An actual task is to connect a personal computer (PC) to the SpaceFibre network. The PC can be used for debugging, for generating test data streams, for monitoring network operation. Most modern PCs have an Ethernet interface. This paper proposes the Eth-SpFi 1.0 protocol designed to solve this problem. The paper presents a variant of the hardware implementation of the protocol and a mathematical model for evaluating the characteristics of data transmission achievable with using this protocol. Using these models, the characteristics of the protocol were evaluated, the recommended values of parameters affecting the achievable characteristics were determined.

**Keywords:** Ethernet network, SpaceFibre network, hardware implementation of the protocol, mathematical model of the protocol, evaluation of protocol characteristics

**For citation:** Vinogradov A. Yu., Suvorova E. A., Syschikov A. Yu. Methods for detecting and eliminating bottlenecks that reduce the bandwidth of SpaceFibre-Ethernet bridges. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(1):15–24. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-15-24.

## Введение

Стандарт SpaceFibre является современным перспективным стандартом передачи данных для бортовых вычислительных сетей [1]. Данный стандарт появился сравнительно недавно, в 2019 г. Вследствие этого в настоящее время существует довольно большое количество оборудования, которое не имеет интерфейсов SpaceFibre, но которое необходимо подключать к таким сетям. В частности, актуальной задачей является подключение к сети SpaceFibre лабораторного оборудования и, особенно, рабочих станций (персональных компьютеров, ПК). В настоящее время распространен интерфейс Ethernet: он имеется у большинства современных компьютеров [2]. Актуальной задачей является обеспечение возможности передачи данных между сетями Ethernet и SpaceFibre. Одним из типовых решений подобного рода задач являются межсетевые мосты, поэтому для решения задачи подключения лабораторного оборудования к сети SpaceFibre могут использоваться мосты Ethernet-SpaceFibre. Стандарты передачи данных, используемые в сетях на базе Ethernet, существенно отличаются от стандарта SpaceFibre. В частности, различаются форматы и размеры передаваемых объектов данных (фреймов, пакетов), используются разные схемы управления потоком данных и др. При этом необходимо обеспечивать целостность и своевременность передачи данных. Эти требования являются одними из важнейших для большинства современных сетей. Вследствие этого необходим специальный протокол для организации обмена данными между этими сетями. Протокол должен обеспечивать требуемые характеристики передачи данных с учетом имеющихся различий между стандартами.

Протокол Eth-SpFi 1.0, который является логическим продолжением протокола Eth-SpW [3, 4] (протокол, реализованный в межсетевом мосте SpaceWire-Ethernet), был создан с этой целью. В Eth-SpFi 1.0 имеется ряд существенных изменений и дополнений по сравнению с Eth-SpW в соответствии с функциональными возможностями стандарта SpaceFibre.

Необходимо отметить, что при использовании предлагаемой нами версии протокола в терминальном узле с интерфейсом Ethernet для взаимодействия с узлами сети SpaceFibre потребуются использование специального программного обеспечения (ПО). Это ПО потенциально может быть реализовано таким образом, чтобы для прикладного уровня стандарт сети, в которой находится абонент, с которым осуществляется взаимодействие, был не важен. При этом без такого специа-

лизированного ПО по стандартным протоколам, применяемым в Ethernet, взаимодействие с абонентами сети SpaceFibre будет невозможно.

В данной статье будут даны аналитические оценки достижимых характеристик передачи данных с использованием предлагаемого протокола Eth-SpFi 1.0. Предложен вариант реализации моста с поддержкой этого протокола в FPGA Virtex 7. Для реализации оценены характеристики передачи данных и дано их сравнение с аналитическими результатами.

## Обзор протокола Eth-SpFi 1.0

Протокол Eth-SpFi 1.0 разрабатывался таким образом, чтобы было возможно не только непосредственное подключение терминального узла (ПК) с интерфейсом Ethernet к мосту Ethernet-SpaceFibre, но и удаленное подключение через коммутируемую сеть на базе Ethernet. Поэтому в текущей версии протокола Eth-SpFi 1.0 со стороны Ethernet используются стандартные протоколы IP [5], UDP [6]. Это обеспечивает возможность передачи данных через сети Ethernet со стандартным сетевым оборудованием. Таким образом, терминальные узлы с интерфейсами Ethernet, которым необходимо взаимодействовать с устройствами SpaceFibre, могут подключаться к мосту SpaceFibre-Ethernet не напрямую через общий коммутатор, а через сеть Ethernet произвольной топологии.

Протокол Eth-SpFi 1.0 реализован поверх протокола UDP. Поле данных UDP-фрейма используется как контейнер для этого протокола. Протокол Eth-SpFi 1.0 никак не влияет на прохождение пакета через сеть на базе Ethernet и используется (обрабатывается) только в мосте Ethernet-SpaceFibre. Данный протокол используется для передачи пакетов данных, управляющих кодов (broadcast, маркеров времени, распределенных прерываний и подтверждений) SpaceFibre, служебной информации, необходимой для управления потоками данных (исключаются потери данных из-за отсутствия свободного места в буферах приемников), информации об ошибках в ходе передачи, информации о состоянии моста и команд конфигурирования моста. Передача данных может осуществляться в направлении от терминального узла к мосту и от моста к терминальному узлу. Информация, необходимая для управления потоками данных, и информация об ошибках передается в направлении, противоположном соответствующему потоку данных.

В стандартах на базе Ethernet и SpaceFibre используются разные форматы сетевого заголовка

пакета данных, разные схемы управления потоком, в стандарте SpaceFibre поддерживается независимая передача нескольких потоков данных (механизм виртуальных сетей). В Eth-SpFi 1.0 реализованы механизмы, обеспечивающие согласование этих различий. Фреймы данных включают в себя пакеты SpaceFibre с сетевыми заголовками SpaceFibre, а также дополнительную информацию для идентификации принадлежности пакетов к виртуальным каналам/виртуальным сетям SpaceFibre. При передаче данных от терминального узла пакет SpaceFibre упаковывается во фрейм Eth-SpFi 1.0 с использованием специализированного ПО. Такой фрейм отправляется в сторону моста, если в приемных буферах моста достаточно места для его приема. Механизм кредитования, обеспечивающий передачу этой информации, будет рассмотрен далее. Если фрейм был передан в мост без ошибок (механизм определения ошибок будет также рассмотрен далее), то в мосте из него извлекается пакет SpaceFibre и передается в соответствующий виртуальный канал. В случае выявления ошибок мост передает информацию о них обратно в терминальный узел. В соответствии с этой информацией выполняется повторная передача фреймов. При передаче данных от моста к терминальному узлу выполняются аналогичные действия.

В протоколе определены два типа фреймов – фреймы данных и служебные фреймы. К служебным фреймам относятся фреймы кредитования (используются для управления потоками данных), фреймы телеметрии (содержат информацию о состоянии моста) и фреймы конфигурирования моста. Необходимо отметить, что фреймы данных также могут содержать служебную информацию: это сделано для сокращения накладных расходов на передачу служебной информации, увеличения полезной пропускной способности. Каждый фрейм содержит около 70 байтов служебной информации (включая преамбулу и межкадровый интервал). Соответственно, передача служебной информации отдельными фреймами может привести к существенному снижению полезной пропускной способности и увеличению задержек при передаче данных. Служебная информация, при наличии обмена данными, интегрируется во фреймы данных, а передача отдельными фреймами осуществляется только в отсутствие передач данных в соответствующем направлении.

Кроме этого, каждый тип фрейма использует свой порт UDP [6] – это упрощает определение типа фрейма. На стороне терминального узла это упрощает организацию ПО и позволяет определить разные приоритеты при обработке разных типов фреймов.

Рассмотрим механизм определения ошибок при передаче. Каждый фрейм снабжается порядковым номером и контрольной суммой. Если в ходе передачи фреймы по тем или иным причинам будут утрачены, то определить это можно будет по порядковым номерам следующих фреймов, точнее, по приходу фрейма с некорректным номером. Ошибки внутри фрейма могут быть выявлены при помощи проверки контрольной суммы.

Теперь рассмотрим механизм кредитования. Передающая и принимающая стороны имеют счетчики переданных и, соответственно, принятых данных. Принимающая сторона отправляет значения своего счетчика принятым данным передающей стороне. Передающая сторона, получив счетчик принимающей стороны, может сравнить свой счетчик с принятым и посчитать количество данных, находящихся в сети между передающей и принимающей сторонами. Если количество данных в сети больше буфера принимающей стороны, то передача приостанавливается.

## Форматы фреймов протокола

### Фрейм данных

Фрейм данных является основным транспортным фреймом и переносит непосредственно сами данные, а также коды распределенных прерываний и информирует об ошибках. Фрейм может содержать либо пакет SpaceFibre, либо часть пакета SpaceFibre, и управляющий код (маркер времени, код распределенного прерывания или подтверждения).

Формат фрейма данных показан на рис. 1.

Поле данных UDP-пакета включает в себя флаги типа и кредита, номер фрейма, номер пакета, объем передаваемых данных, пакет данных SpaceFibre или его часть, CCODE, поле, содержащее информацию об ошибках, и поле флагов присутствия CCODE, информацию об ошибках и о конце пакета.

Поле «Номер фрейма» – порядковый номер фрейма, оно присутствует во всех типах фреймов Eth-SpFi 1.0 и позволяет выявлять изменение порядка следования и потерю фреймов в процессе передачи по сети Ethernet.

Поле «Номер пакета» – порядковый номер пакета, оно используется в дополнение к номеру фрейма и позволяет выявлять изменение порядка следования и потерю фреймов, содержащих данные. В частности, позволяет не осуществлять повторные передачи данных, если были потеряны служебные фреймы.



Ethernet

Преамбула	Стартовый байт	MAC-назначение	MAC-отправитель	Тип	Заголовок IP	Заголовок UDP	Данные X	CRC	Межкадровый интервал
7	1	6	6	2	24	8	X	4	12

Ethernet-SpaceFibre

Флаги типа и кредита	Номер фрейма	Номер пакета	Объем переданных данных	Данные SpaceFibre	CCODE	Ошибки	MAGIC (5d)	Флаги присутствия CCODE, ошибок, EEP и EOP
	2		8	X	1	2		2

SpaceFibre

адрес	данные	eop
0-∞	0-∞	1

- Рис. 1. Формат фрейма данных
- Fig. 1. Data frame

Поле «Объем передаваемых данных» используется для кредитования и показывает объем всех переданных данных по каналу.

Поле «Данные SpFi» необязательное, может присутствовать или отсутствовать во фрейме. Содержит пакет SpaceFibre или его часть. Если во фрейме расположено начало пакета SpaceFibre, то в начале этого поля содержится сетевой заголовок SpaceFibre. Далее расположено поле данных (его часть). Если в этом поле расположен конец пакета, то в поле «Флаги» присутствия CCODE, ошибок, EEP, EOP должен быть установлен флаг EEP или EOP (в зависимости от типа конца пакета).

Поле «CCODE» необязательное, может присутствовать или отсутствовать во фрейме. Если возникает необходимость передачи CCODE в отсутствие передачи данных, то фрейм данных может содержать только CCODE. Если необходимость передачи CCODE возникает на фоне передачи данных, то заполнение текущего фрейма данными останавливается (оставшаяся часть пакета будет передана следующим фреймом). Во фрейм помещается CCODE. Это позволяет сократить время передачи CCODE, что для управляющих кодов очень существенно. Если CCODE присутствует во фрейме, то должен быть установлен флаг присутствия CCODE.

Если при приеме фреймов были выявлены ошибки, то в передаваемый фрейм данных включается информация об ошибках. В этом случае должен быть установлен флаг ошибок. Если ошибки приема были выявлены в момент, когда

передача данных и управляющих кодов отсутствует, то будет сформирован фрейм данных, содержащий только служебную информацию об ошибках.

### Фрейм кредитования

Фрейм кредитования используется для управления потоком. Формат фрейма показан на рис. 2.

Текущая версия протокола ориентирована на поддержку до шести виртуальных каналов (виртуальных сетей) SpaceFibre. Такое число каналов поддерживается во многих устройствах SpaceFibre. В дальнейшем число каналов может быть увеличено.

### Фрейм телеметрии

Фрейм телеметрии – это служебный фрейм. Передается только в сторону от моста Ethernet-SpaceFibre к терминальному узлу (ПК). Он используется для передачи в ПО ПК информации о состоянии моста, основных параметрах, таких как количество переданной информации по каждому из виртуальных, флаги ошибок, версии прошивки. Формат фрейма показан на рис. 3.

### Фрейм настроек

Фрейм настроек (рис. 4) – это также служебный фрейм. Используется для чтения, записи и подтверждения настроек в мосте SpaceFibre-Ethernet.

Возникают ситуации, когда в один момент времени может быть необходимо передать несколько

Ethernet

Преамбула	Стартовый байт	MAC-назначение	MAC-отправитель	Тип	Заголовок IP	Заголовок UDP	Данные X	CRC	Межкадровый интервал
7	1	6	6	2	24	8	107	4	12

Фрейм кредитов

Номер фрейма	Объем переданных данных по каналу 1	Объем переданных данных по каналу 2	Объем переданных данных по каналу 3	Объем переданных данных по каналу 4	Объем переданных данных по каналу 5	Объем переданных данных по каналу 6	Magic «37»	Номер фрейма +1	Резерв
4	8	8	8	8	8	8	1	4	50

- Рис. 2. Формат фрейма кредитования
- Fig. 2. Credit frame

Ethernet

Преамбула	Стартовый байт	MAC-назначение	MAC-отправитель	Тип	Заголовок IP	Заголовок UDP	Данные X	CRC	Межкадровый интервал
7	1	6	6	2	24	8	251	4	12

Фрейм телеметрии

Номер фрейма	MAC-адреса	IP-адреса	Объем переданных данных по каналам	Объем принятых данных по каналам	Состояние таблицы ARP	Версия прошивки	Флаги ошибок	CRC 8 посл. фрейма	UPTIME	Состояние SpaceFibre	Номер фрейма +1	Резерв
4	48	32	48	48	1	30	6	6	4	2	4	18

- Рис. 3. Формат фрейма телеметрии
- Fig. 3. Telemetry frame

Ethernet

Преамбула	Стартовый байт	MAC-назначение	MAC-отправитель	Тип	Заголовок IP	Заголовок UDP	Данные X	CRC	Межкадровый интервал
7	1	6	6	2	24	8	X	4	12

Фрейм настроек

MAGIC «BRDGCNFG»	Параметр 1	Параметр 2	Параметр N	Конец списка параметров «0»
8	X	X	X	1

Структура параметра

Адрес	Режим R/W	Флаг ответа	Размер	DATA
1		1		X

- Рис. 4. Фрейм настроек
- Fig. 4. Settings frame

фреймов разных типов. В этом случае очередностью передачи фреймов управляет арбитр согласно их приоритетам. Фреймы имеют следующие приоритеты при передаче:

- 1) данные;
- 2) кредитование;
- 3) телеметрия;
- 4) настройки.

В соответствии с приоритетами осуществляется арбитраж в случае, если несколько фреймов разных типов одновременно готовы к передаче.

Характеристики передачи данных – это достижимая скорость передачи данных и полезная пропускная способность. Они зависят от того, как часто отправляется информация, необходимая для управления потоком (кредитование), от интенсивности потока данных в противоположном направлении, от числа потоков данных, которые участвуют в арбитраже, от особенностей реализации арбитра.

Для оценки характеристик нами будут рассмотрены два варианта передачи данных. В первом варианте передача данных будет осуществляться только в одну сторону – от ПК в сеть SpaceFibre. Во втором варианте передача данных будет осуществляться в обе стороны – и от ПК в сеть SpaceFibre, и из сети SpaceFibre к ПК.

Далее будут приведены оценки этих параметров с использованием макета и математической модели и выполнен анализ результатов.

## Макет для исследования характеристик протокола Eth-SpFi 1.0

Для исследования характеристик протокола Eth-SpFi 1.0 был разработан прототип моста, реализующего этот протокол. Прототипная реализация собрана на базе ПЛИС Virtex 7 [7]. Данная ПЛИС имеет один порт Ethernet, работающий по стандарту 1000BASE-T, и встроенный высокоскоростной приемопередатчик GXT, который может быть использован для работы с сетью SpaceFibre. Для ПЛИС была разработана специальная прошивка, включающая в себя порты Ethernet, SpaceFibre и автоматы, реализующие протокол Eth-SpFi 1.0. Скорость приема/передачи по SpaceFibre для данной прошивки составляет 1250 Мбит/с. Внутренняя часть моста функционирует на частоте 125 МГц.

В качестве терминального узла используется рабочая станция с сетевой картой Intel I350 Gigabit Ethernet. В исследованиях, рассматриваемых нами, мост подключен к сетевой карте рабочей станции напрямую без какого-либо дополнительного сетевого оборудования. Это позволяет

наиболее точно оценить достижимые характеристики моста при передаче (исключить влияние дополнительного сетевого оборудования).

Данная рабочая станция функционирует под управлением ОС Debian GNU/Linux 11 (bullseye). Программное обеспечение написано на языке «C» и собрано с помощью компилятора gcc. ПО обеспечивает реализацию протокола Eth-SpFi 1.0.

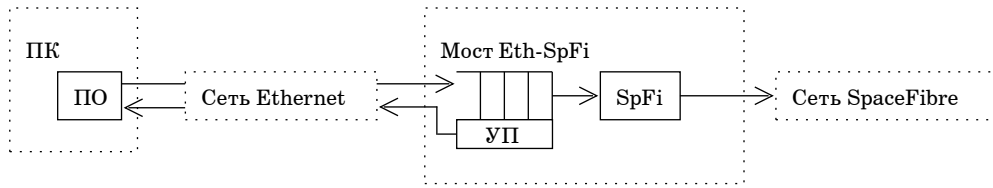
Нами были выполнены оценки достижимых характеристик при передаче данных в одну сторону и при передаче данных в обе стороны. При передаче данных в одну сторону служебные фреймы (кредитование, информация об ошибках) передаются в противоположном направлении. Поэтому в данном случае достигается наименьшее время передачи данных (передача данных может быть приостановлена только в отсутствии кредитов). При передаче данных в обоих направлениях служебные фреймы передаются также в обоих направлениях. Из-за этого время передачи данных увеличивается.

Рассмотрим передачу данных от ПО до сети SpaceFibre. Данные для передачи запаковываются согласно протоколу Eth-SpFi 1.0 во фрейм UDP и через сетевую карту отправляются в сеть Ethernet в мост SpaceFibre-Ethernet. Поступивший в мост фрейм UDP анализируется, и из него извлекаются полезные данные. Если ошибок нет, они поступают в буфер данных, после этого данные передаются через приемопередатчик SpaceFibre в сеть. Если же при анализе UDP выявлена ошибка (неверные номер фрейма, повреждены или отсутствуют заголовки, ошибка CRC), то данные отбрасываются и в сеть Ethernet для ПК выдается фрейм, содержащий информацию о произошедшей ошибке.

Рассмотрим передачу данных в обратную сторону – из сети SpaceFibre в Ethernet. Пакет SpaceFibre поступает на приемопередатчик SpaceFibre, затем данные запаковываются в UDP и ожидают в очереди на отправку в сеть Ethernet. Очередью передачи данных в Ethernet управляет арбитр (в мосте он реализован аппаратно). После передачи данных в сеть они принимаются сетевой картой ПК и передаются в управляющее ПО.

Схема макета включает в себя ПК с интерфейсом Ethernet, соединенный с мостом Ethernet-SpaceFibre, который, в свою очередь, соединен с сетью SpaceFibre.

Сначала рассмотрим первый, упрощенный, вариант передачи данных (при котором данные передаются только в одну сторону – от ПК в сеть SpaceFibre). На рис. 5 показана схема макета, реализующая этот вариант передачи данных. Данная схема учитывает все возникающие задержки, однако, во избежание громоздкости, показанная схема не отображает всей внутренней



• Рис. 5. Схема макета для оценки характеристик при использовании первого варианта передачи данных  
 • Fig. 5. Layout for performance evaluation when using the first data transmission option

структуры моста SpaceFibre-Ethernet, в котором и используется предлагаемый нами протокол.

Данные передаются из специального ПО в сеть Ethernet с использованием протокола UDP, затем они поступают на приемный буфер, ограниченный аппаратно размером в 32 Кб, а дальше данные передаются на приемопередатчик SpaceFibre. Во избежание переполнения аппаратного буфера протоколом предусмотрен механизм управления потоком (УП). Используемый механизм изображен на рис. 6 и имеет два счетчика, один из них показывает количество данных, переданных в сеть Ethernet (счетчик 1), а второй – количество данных перед приемопередатчиком SpaceFibre (счетчик 2), т. е. получается, что буфер располагается между этими двумя счетчиками и таким образом можно контролировать его заполнение.

Во второй схеме передачи добавляется поток данных в обратную сторону, также в эту сторону все еще будет передаваться информация о кредитовании. В месте, где собираются Ethernet-фреймы, установлен арбитр (АРБ), который управляет разными потоками данных и обеспечивает равномерный доступ к потокам данных. Работа аппаратного арбитра осуществляется по

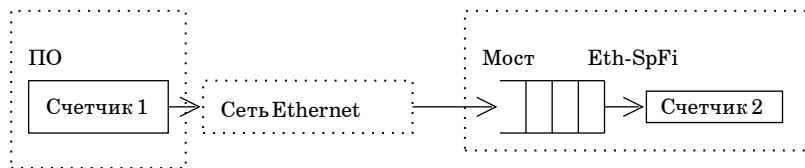
следующему алгоритму: одному из устройств выдается разрешение на передачу данных в течение десяти тактов; если устройство не начало передачу, то разрешение переходит следующему устройству. В текущей конфигурации моста арбитр управляет 16 потоками данных, из них 6 – для передачи данных, 1 – для кредитования и остальные 9 – служебные. Схематичное изображение этой модели дано на рис. 7.

### Математическая модель для оценки характеристик протокола Eth-SpFi 1.0

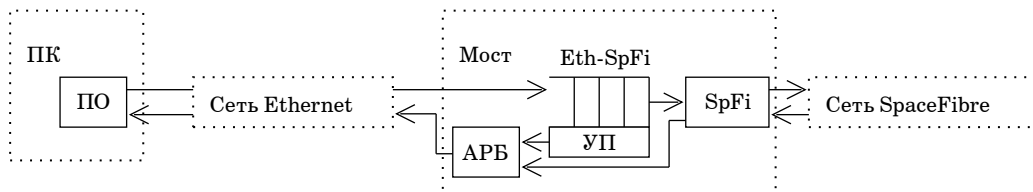
Построим математическую модель для моделей, показанных на рис. 5; 7. Скорость передачи данных можно вычислить по формуле:

$$U = \frac{\text{MIN}(U_{\text{data}} T_{\text{all}}, S_{\text{buf}})}{T_{\text{cred}}} - U_{\text{credit}}, \quad (1)$$

где  $U$  – скорость передачи данных через мост;  $U_{\text{data}}$  – максимальная возможная скорость передачи полезных данных;  $U_{\text{credit}}$  – скорость данных кредитования;  $T_{\text{all}}$  – общая задержка передачи



• Рис. 6. Механизм управления потоком  
 • Fig. 6. Flow control mechanism



• Рис. 7. Схема макета для оценки характеристик при использовании второго варианта передачи данных с арбитром Ethernet  
 • Fig. 7. Layout diagram for performance evaluation when using the second data transmission option with an Ethernet arbiter

пакета;  $S_{buff}$  – объем буфера кредитования;  $T_{cred}$  – период передачи фреймов кредитования.

Формула скорости полезных данных при передаче с арбитром будет аналогичная.

Далее вычислим максимальную скорость полезных данных по сети Ethernet при передаче 1000 байт полезных данных на один пакет:

$$U_{data} = \frac{F(S_{ipg} + S_{frame})}{S_{data}}. \quad (2)$$

Максимальная скорость передачи с арбитром:

$$U_{data+arb} = \frac{F(S_{ipg} + S_{frame} + S_{arb})}{S_{data}}, \quad (3)$$

где  $U_{data}$  – скорость полезных данных;  $U_{data+arb}$  – скорость полезных данных при использовании арбитра внутри моста;  $F$  – частота передачи 1 байта (125 МГц);  $S_{ipg}$  – межкадровый интервал (15 байт);  $S_{frame}$  – размер фрейма вместе с протоколом Ethernet-SpaceFibre и полезными данными (1054 байта);  $S_{arb}$  – задержка арбитра (160 байт);  $S_{data}$  – размер полезных данных (1000 байт).

Общая задержка передачи данных вычисляется по формуле:

$$T_{all} = T_{frame} + T_{data} + T_{credit} + T_{arb} + \frac{1}{F_{credit}}, \quad (4)$$

где  $T_{frame}$  – время передачи фрейма;  $T_{data}$  – время передачи полезных данных;  $T_{credit}$  – время передачи одного фрейма кредитования;  $T_{arb}$  – время задержки на арбитра (0 – если модель без арбитра);  $F_{credit}$  – частота кредитования.

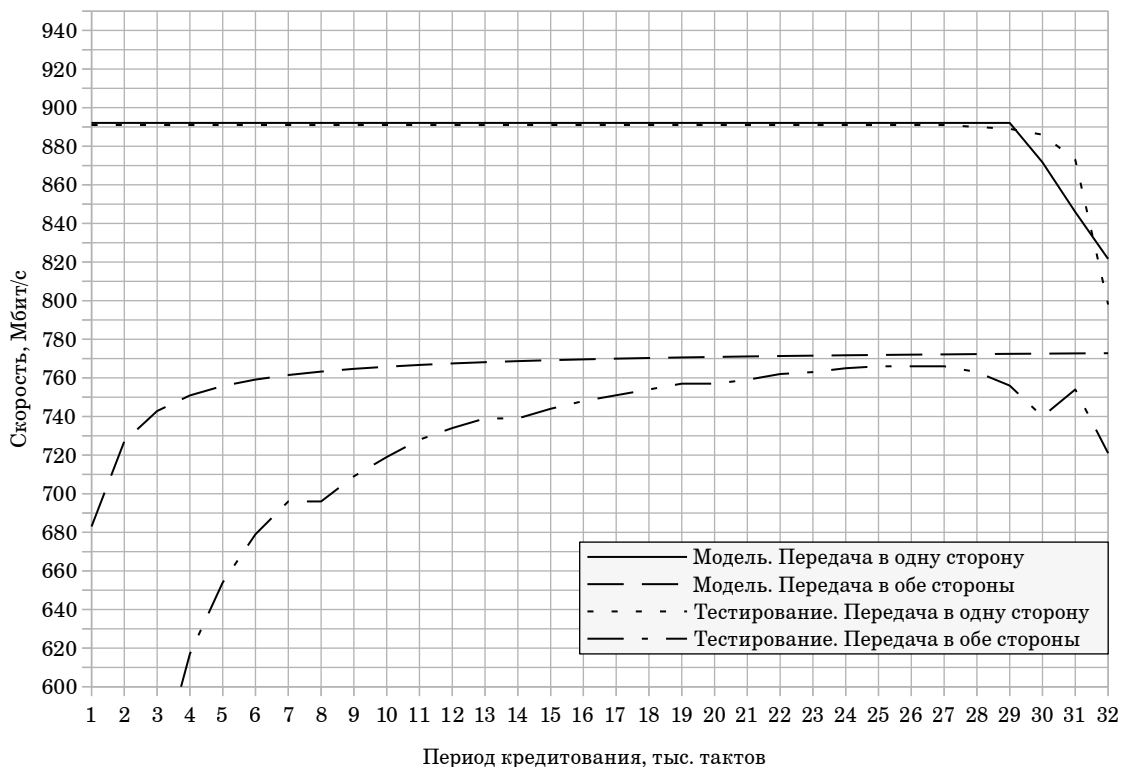
Скорость кредитования можно вычислить с использованием частоты кредитования  $F_{credit}$ , размера кредитования  $S_{credit}$  и частоты кредитования  $F_{credit}$ :

$$U_{credit} = (S_{ipg} + S_{credit})F_{credit}. \quad (5)$$

### Результаты, полученные с использованием моделей

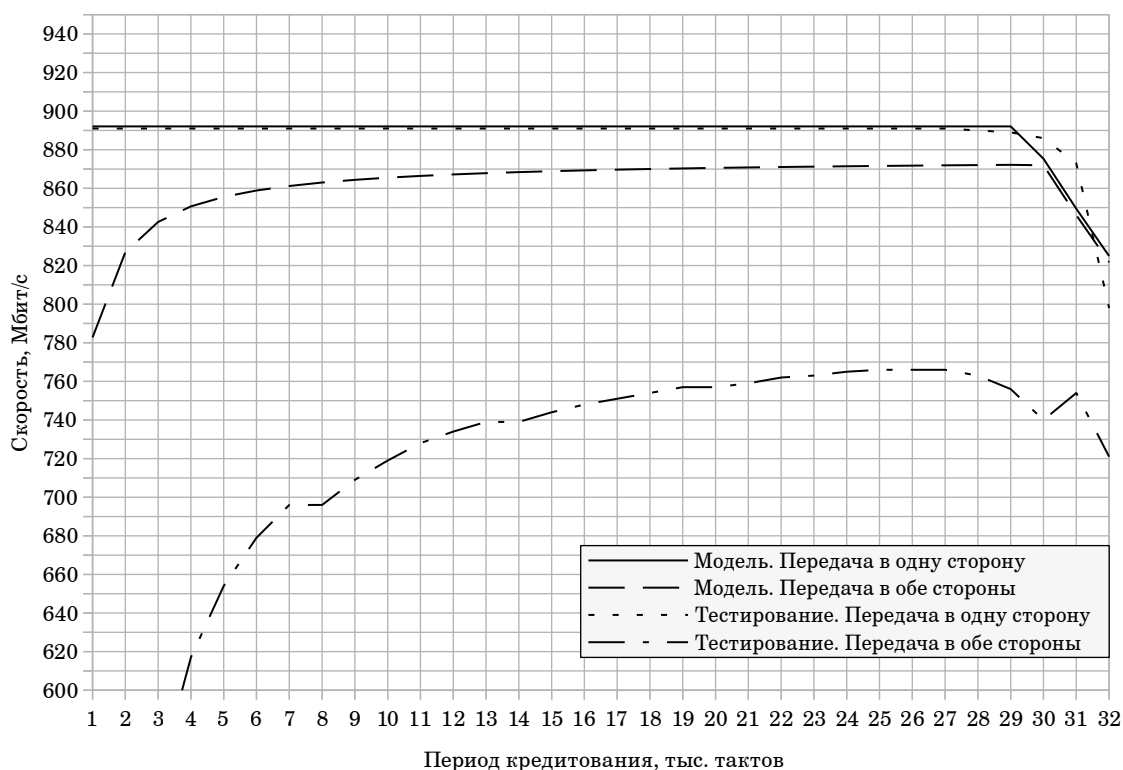
По описанным моделям и при практическом тестировании были получены результаты, отражающие зависимость частоты кредитования от скорости передачи данных. Результаты показаны на рис. 8.

Графики на рис. 8 показывают, что при увеличении частоты кредитования скорость передачи данных не увеличивается, а, наоборот, уменьшается, поскольку, кроме полезных данных, требуется передавать поток данных кредитования, который как раз с повышением частоты кредитования увеличивается (графики передачи в обе сто-



• Рис. 8. Результаты моделирования и тестирования  
 • Fig. 8. Simulation and testing results





- Рис. 9. Моделирование с измененным арбитром
- Fig. 9. Simulation with a modified arbiter

роны). Если же частоту кредитования снизить, то это приведет все к тому же эффекту – скорость будет падать, только в этом случае уже из-за того, что приемный буфер будет заполнен (графики передачи в одну сторону). Как видно, наилучший период передачи кредитования находится в районе 25 000–27 000 тактов.

В качестве эксперимента мы изменили число потоков данных, обрабатываемых арбитром, с 16 (как в практическом тестировании) до 2. Результат показан на рис. 9: теоретическая скорость увеличилась, но наилучший период кредитования не изменился и все так же находился около 26 000 тактов. Таким образом, можно сделать вывод, что арбитр нуждается в существенной доработке, так как он останавливается на каждом потоке и ожидает передачу данных в течение десяти тактов.

## Заключение

Нами предложены протокол Eth-SpFi 1.0, предназначенный для обеспечения передачи данных между сетями Ethernet и SpaceFibre, а также программная и аппаратная реализация данного протокола. Выполнены оценки характеристик протокола для этих реализаций с использованием разработанной математической модели и при практическом тестировании.

По результатам исследования определены рекомендуемые значения для периода кредитования. Определено, что используемый алгоритм арбитража ограничивает достижимые характеристики и нуждается в доработке. В дальнейшем планируется разработать новый алгоритм арбитража, позволяющий устранить эти недостатки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C // ESA-ESTEC. The Netherlands: Noordwijk, 2019. 233 p.
2. IEEE STANDARTS ASSOCIATION. IEEE Standart for Ethernet. N.-Y., 2012.
3. Виноградов А. Ю., Яблоков Е. Н. Исследование протокола Ethernet-Spacewire // Известия Самар. науч. центра РАН. 2017. Т. 19, № 1–2. С. 391–395.
4. Виноградов А. Ю., Яблоков Е. Н. Практическое использование протокола Ethernet-Spacewire // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. 1. СПб., 10–14 апр. 2017 г. СПб.: ГУАП, 2017. С. 32–35.

5. Postel J. «Internet Protocol» RFC 760, USC / Information Sciences Institute. 1980. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc760> (дата обращения: 18.11.2022).
6. Postel J. «User Datagram Protocol», STD 6, RFC 768, DOI 10.17487/RFC0768, August 1980. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/pdf/rfc768> (дата обращения: 18.11.2022).
7. DS180 – 7 Series FPGAs Data Sheet: Overview. URL: [https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds180\\_7Series\\_Overview](https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds180_7Series_Overview) (дата обращения: 18.11.2022).

## REFERENCES

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. ESA-ESTEC. The Netherlands: Noordwijk; 2019. 233 p.
2. IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Standard for Ethernet. New York, 2012.
3. Vinogradov A., Yablokov E. Research of the Ethernet-Spacewire protocol. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017;19(1-2):391–395. (In Russ.).
4. Vinogradov A., Yablokov E. Practical use of the Ethernet-Spacewire protocol. GUAP Scientific session: Collection of reports: in 3 parts. P. 1. SPb., 10–14 April 2017. SPb.: SUAI; 2017, pp. 32–35. (In Russ.).
5. Postel J. «Internet Protocol» RFC 760, USC / Information Sciences Institute. 1980. Available from: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc760> [Accessed 18 November 2022].
6. Postel J. «User Datagram Protocol», STD 6, RFC 768, DOI 10.17487/RFC0768, August 1980. Available from: <https://datatracker.ietf.org/doc/pdf/rfc768> [Accessed 18 November 2022].
7. DS180 – 7 Series FPGAs Data Sheet: Overview. Available from: [https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds180\\_7Series\\_Overview](https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds180_7Series_Overview) [Accessed 18 November 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виноградов Алексей Юрьевич**, инженер лабораторий сетей и систем-на-кристалле Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – исследования в области бортовых сетей, разработка IP-блоков и протоколов обмена на языках HDL.

**Суворова Елена Александровна**, кандидат технических наук, заведующая лабораторией сетей и систем-на-кристалле Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Область научных интересов – динамическая реконфигурация как средство адаптации локальных вычислительных сетей и систем-на-кристалле к решаемым задачам и к сбоям и отказам, возникающим в ходе эксплуатации систем.

**Сыщик Алексей Юрьевич**, заведующий лабораторией программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – исследования в области параллельного программирования и встраиваемых систем, модели вычислений, разработка предметно-ориентированных языков, создание и моделирование набора инструментов для DSL и встроенных систем.

**Vinogradov Alexey Yu.**, Engineer at the Laboratory of Networks and the Systems-on-chip, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – research in the field of on-board networks, development of IP blocks and exchange protocols in HDL languages.

**Suvorova Elena A.**, PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Networks and the Systems-on-chip, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – dynamic reconfiguration as a means of adapting local computer networks and systems-on-a-chip to the tasks being solved and to failures and faults that occur during the exploitation of systems.

**Syschikov Alexey Yu.**, Head at the Laboratory of Parallel Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – parallel programming and embedded systems, models of computation, domain-specific language development, generating and modeling tool flows for DSLs and embedded systems.

Поступила в редакцию 26.10.2022

Поступила после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Received 26.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 30.01.2023

## Архитектура базы данных для автоматизированных измерений

Ольга Витальевна Чупринова<sup>1</sup>

✉ Chuprinova\_o@mail.ru

Анна Сергеевна Степашкина<sup>1</sup>

stepashkina.anna@yandex.ru, orcid.org/55605720600

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрен вариант архитектуры базы данных для производственных предприятий. Основными целями создания базы данных являются ускорение процессов обработки и анализа данных, повышение эффективности производственных процессов. Описаны основные программы для реализации.

**Ключевые слова:** автоматизация производства, базы данных, цифровые измерения, «умные» средства измерений

**Для цитирования:** Чупринова О. В., Степашкина А. С. Архитектура базы данных для автоматизированных измерений // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 25–28. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-25-28.

Original article

## Database architecture for automated measurements

Olga V. Chuprinova<sup>1</sup>

✉ Chuprinova\_o@mail.ru

Anna S. Stepashkina<sup>1</sup>

stepashkina.anna@yandex.ru, orcid.org/55605720600

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** A variant of the database architecture for manufacturing enterprises is considered. The main purpose of the creation is to accelerate the processes of data processing and analysis, to increase the efficiency of production processes. The main programs for implementation are described.

**Keywords:** production automation, databases, digital measurements, smart measuring instruments

**For citation:** Chuprinova O. V., Stepashkina A. S. Database architecture for automated measurements. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(1):25–28. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-25-28.

### Введение

С использованием цифровых технологий изменяются процессы производства и работа людей на предприятиях. Основными целями автоматизации производства являются повышение качества продукции и эффективности производственного процесса, а также улучшение экономических показателей предприятия и обеспечение безопасности труда. На сегодняшний день активно развиваются цифровизация измерений, регистрация показаний, обработка показаний и данных, хранение информации (так называемые «большие данные»), анализ данных, документооборот и беспроводные технологии. Это связано с необходимостью большой точности измерений и анализа полученных данных, а также большими затратами времени работников на обработку информации, учет и проверку оборудования, а

также с издержками, связанными с некорректной работой оборудования и некорректными результатами. Начиная с 2017 г. в нашей стране вводится государственная программа «Цифровая экономика», включающая в себя большие данные и новые производственные технологии [1]. Согласно данной программе, предприятия, связанные с проведением измерений или испытаний, должны вести документальную электронную базу. На государственном уровне такая обязательная база регулируется Федеральным информационным фондом по обеспечению единства измерений – Федеральной государственной информационной системой (ФГИС) «АРШИН», которая должна содержать информацию о результатах поверки средств измерения, методах и методиках измерений, а также сведения об отнесении технических средств к средствам измерений на предприятии. Иначе говоря, «АРШИН» – это вторая очередь

Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений. И главной целью является передача результатов поверок в государственные органы. Несмотря на наличие такой государственной базы, каждому отдельно взятому производству требуется ведение внутренней документации, а также документации, связанной с производственными процессами, обработкой данных и хранением информации.

### Построение архитектуры

Кроме вопроса о переходе на цифровые технологии, остро стоит вопрос автоматизации. Основу производства составляют технологические процессы разного назначения. Автоматизация технологических процессов является наиболее сложной задачей. Современные средства автоматизации представляют собой комплекс машин и механизмов с электронными и компьютерными системами управления [2]. Основными средствами достижения автоматизации на производстве являются:

- 1) замена человеческого труда машинным;
- 2) машины с числовым управлением – станки, запрограммированные на выполнение определенных работ, способные осуществлять весь технологический процесс. При таком виде автоматизации вмешательство человека заключается в проверке и наладке оборудования и сведено к минимуму, один оператор способен обслуживать несколько станков;
- 3) роботы – способны облегчать труд, выполняя тяжелые или опасные виды работ;
- 4) информационные технологии – внедрение компьютерного оснащения в производство облегчает интеллектуальный труд, оно выполняет за

работника интеллектуальный труд, обеспечивая выполнение рутинных и сложных вычислительных задач;

5) системы автоматизированного проектирования – применение программного обеспечения для решения узкоспециализированных задач. Посредством прикладных программ создаются алгоритмы работы оборудования, что позволяет прогнозировать качество, характеристики и оптимальную технологию.

Говоря подробнее о системах автоматизированного проектирования, рассмотрим задачу автоматизации регистрации результатов измерений и обработки информации. Для создания такого алгоритма необходимо решить несколько основных задач:

- 1) варианты подключения всех средств измерений к общей базе;
- 2) регистрация отдельно взятых средств измерений;
- 3) наработка базы «нормальных» показаний приборов;
- 4) создание единой базы регистрации и обработки измерений.

Рассмотрим архитектуру базы данных как трехуровневую систему (рисунок).

Первый уровень содержит данные из хранилища базы. Закладываемые на первом уровне данные имеют «единичное» значение и не разбиваются на другие, более мелкие. Например, сведения о маркировке прибора, его название, единицы измерения, измеряемые им величины, номер технического регламента, номер документа.

Второй уровень состоит из структурированного массива данных, подходящего для анализа и сложных запросов. Реализуется на основе универсальных реляционных баз данных. На



- Схема структуры базы данных
- Database structure diagram

этом уровне создаются связи зависимости между хранилищами первого уровня. Выставляются зависимости данных измеряемых величин с прибором. Создавая эту связь, мы получим результаты с конкретного средства измерений.

Третий уровень – пользовательский. Включает в себя инструменты для анализа и работы с данными. Отправляя запрос, оператор должен получить ответ от базы в виде данных или информации.

Итоговая база данных для пользователя содержит два больших массива данных – документальную и измерительную части. Такое разделение позволит параллельно следить за обслуживанием приборов (поверкой, калибровкой) и их работой.

Документальная часть базы включает в себя все необходимые сведения о приборе:

- технический паспорт;
- сведения о поверке;
- сертификат об утверждении средства измерения (СИ);

– документы сертификации, подтверждающие соответствие устройства требованиям техрегламента;

- руководство по эксплуатации;
- сведения о калибровке прибора.

Измерительная часть содержит:

- результаты измерений;
- анализ результатов, выявление больших погрешностей.

Основными целями создания такой базы данных для предприятия являются снижение трудозатрат оператора, ускорение процесса обработки информации, минимизация издержек производства за счет более быстрого обнаружения неточностей в измерениях.

Для обеспечения автоматизированного процесса измерений необходимо использовать так называемые «умные» средства измерений. К ним относятся интеллектуальные датчики, автоматы, автоматизированные установки, которые представляют собой набор средств для регистрации, передачи и обработки данных, с учетом применения интеллектуальных алгоритмов на основе баз знаний. Перечислим основные преимущества «умных» средств измерения.

1. Такие средства измерений способны выдавать более точные результаты за счет применения числовых вычислений для компенсации нелинейности чувствительного элемента.

2. Способны работать с большей разнообразностью разных типов чувствительных элементов и комбинировать два или более измерений в одно новое измерение.

3. Интеллектуальное средство измерений позволяет производить настройку на другие диапазоны измерений или полуавтоматическую калибровку, а также осуществлять функции внутренней самодиагностики, что упрощает техническое обслуживание.

В отличие от аналоговых, у «умных» средств измерений существует две основных части – программная и аппаратная. Соотношение этих частей определяется конкретными задачами. Например, усреднение измерений может быть выполнено как самим датчиком благодаря его свойствам, так и с помощью нескольких измерений с датчика с последующим усреднением программой обработки. Интеллектуальный датчик позволяет производить настройку на другие диапазоны измерений или полуавтоматическую калибровку, а также осуществлять функции внутренней самодиагностики, что упрощает техническое обслуживание.

## Заключение

Для реализации основы базы данных рационально использовать реляционные базы данных SQL – структурированный язык запросов. Независимо от дальнейшего языка программирования, который будет обеспечивать работу алгоритма в программе, SQL позволит извлекать информацию из системы управления базы данных.

Основными преимуществами реляционной базы данных SQL являются:

- 1) точность;
- 2) выполнение сложных запросов;
- 3) возможность работы нескольких пользователей;
- 4) безопасность.

Все данные структурированы, разложены по столбцам и строкам, что позволяет легко оперировать ими. Принцип работы такой базы данных основан на формировании запроса оператором и отправке в хранилище данных. База обрабатывает полученную от оператора информацию и отправляет ответ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» от 28 июля 2017 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 09.10.2022).



2. *Схиртладзе А. Г.* Автоматизация технологических процессов и производств: учебник. М.: Абрис, 2018. С. 12–14.
3. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «Об обеспечении единства измерений». URL: [https://rpn.gov.ru/upload/iblock/ec6/FZ\\_N\\_102\\_20080626.pdf](https://rpn.gov.ru/upload/iblock/ec6/FZ_N_102_20080626.pdf) (дата обращения: 09.10.2022).
4. *Дейт Дж.* SQL и реляционная теория. URL: [https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/SQL\\_i\\_relyatsionnaya\\_teoriya.\\_Kak\\_gramotno\\_pisat\\_kod\\_na\\_SQL\\_Rulit\\_Net\\_308349.pdf](https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/SQL_i_relyatsionnaya_teoriya._Kak_gramotno_pisat_kod_na_SQL_Rulit_Net_308349.pdf) (дата обращения: 09.10.2022).
5. *Емельченко В. О.* Метрология цифровой экономики. Взгляд в будущее. URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029587> (дата обращения: 09.10.2022).
6. *Макаров И. Д., Панов А. В.* Искусственный интеллект: перспективы развития. URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018031957> (дата обращения: 09.10.2022).
7. *Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М.* Машинное обучение. СПб.: Питер, 2017. 336 с.

## REFERENCES

1. The program «Digital Economy of the Russian Federation» of July 3, 28, 2017. Available from: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> [Accessed 09 October 2022].
2. Skhirtladze A. G. Automation of technological processes and productions: Textbook. Moscow: Abris; 2018, pp. 12–14. (In Russ.).
3. Federal Law no. 102-FZ of 26.06.2008 (as amended on 11.06.2021) On Ensuring the Uniformity of Measurements Available from: [https://rpn.gov.ru/upload/iblock/ec6/FZ\\_N\\_102\\_20080626.pdf](https://rpn.gov.ru/upload/iblock/ec6/FZ_N_102_20080626.pdf) [Accessed 09 October 2022].
4. Date J. SQL and relational theory Available from: [https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/SQL\\_i\\_relyatsionnaya\\_teoriya.\\_Kak\\_gramotno\\_pisat\\_kod\\_na\\_SQL\\_Rulit\\_Net\\_308349.pdf](https://www.rulit.me/data/programs/resources/pdf/SQL_i_relyatsionnaya_teoriya._Kak_gramotno_pisat_kod_na_SQL_Rulit_Net_308349.pdf) [Accessed 09 October 2022].
5. Emelchenko I. N. Metrology of the digital economy. A look into the future. Available from: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029587> [Accessed 09 October 2022].
6. Makarov I. D., Panov A. V. Artificial intelligence: development prospects. Available from: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018031957> [Accessed 09 October 2022].
7. Brink H., Richards D., Feverolf M. Machine learning. SPb.: Peter; 2017. 336 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Чупринова Ольга Витальевна**, аспирант, ассистент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – метрология, системы автоматизации, программирование.

**Степашкина Анна Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, технологии искусственного интеллекта.

**Chuprinova Olga V.**, Postgraduate Student, Assistant at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – metrology, automation systems, programming.

**Stepashkina Anna S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical modeling, artificial intelligent technologies.

Поступила в редакцию 27.10.2022

Поступила после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Received 27.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 30.01.2023

## Проблемы проектирования коммуникационных протоколов нового поколения

Валентин Леонидович Оленев<sup>1</sup>

✉ valentin.olenev@guap.ru, orcid.org/0000-0002-1817-2754

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Описан подход, который поможет автоматизировать и формализовать процесс проектирования современных коммуникационных протоколов. Проведен краткий анализ существующих подходов к разработке протоколов. Предложена новая методология, которая охватывает весь процесс разработки, начиная от сбора технических требований и заканчивая созданием окончательной спецификации протокола и его прототипов. Методология позволяет обнаружить все ошибки и несоответствия в протоколах до этапа аппаратной реализации, поэтому ее применение снижает стоимость и время разработки, что решает все основные проблемы проектирования коммуникационных протоколов нового поколения. Разработка в соответствии с методологией успешно заканчивается реализацией спецификации протокола.

**Ключевые слова:** протоколы, сети, проблемы проектирования, методология, спецификация протокола

**Для цитирования:** Оленев В. Л. Проблемы проектирования коммуникационных протоколов нового поколения // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 29–36. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-29-36.

Original article

## Problems of new generation communication protocols design

Valentin L. Olenev<sup>1</sup>

✉ valentin.olenev@guap.ru, orcid.org/0000-0002-1817-2754

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article describes an approach that helps to automate and formalize the process of designing of modern communication protocols. A brief analysis of existing approaches to the development of protocols was carried out. The article proposes a new methodology that covers the entire development process, from the gathering of technical requirements to the creation of the final specification of the protocol and its prototypes. The methodology makes possible detection of all errors and inconsistencies in protocols before the hardware implementation stage, therefore its application reduces the cost and development time, which solves all the main problems of designing new generation communication protocols. Development in accordance with the methodology successfully ends with the implementation of the protocol specification.

**Keywords:** protocols, networks, design problems, methodology, protocol specification

**For citation:** Olenev V. L. Problems of new generation communication protocols design. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):29–36. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-29-36.

### Введение

Разработка протоколов передачи данных – сложный процесс, требующий больших финансовых и временных затрат. К процессу разработки протоколов привлекаются крупные проектные команды, состоящие из узкопрофильных специалистов, программистов, тестеров, ученых, менеджеров и др. Часто команды разработчиков являются интернациональными, состоящими из специалистов разных компаний. Длительность таких проектов в значительной степени зависит от сложности протоколов, но зачастую качественная реализация протоколов, включающая в себя все необходимые этапы по его верификации, занимает несколько

лет. В итоге разработка приводит к написанию спецификации протокола, а перед физической реализацией протокол должен быть тщательно исследован. На многих промежуточных этапах разработки используется моделирование, которое упрощает процесс, снижает его стоимость и помогает избежать серьезных ошибок и исправить их до этапа аппаратной реализации [1].

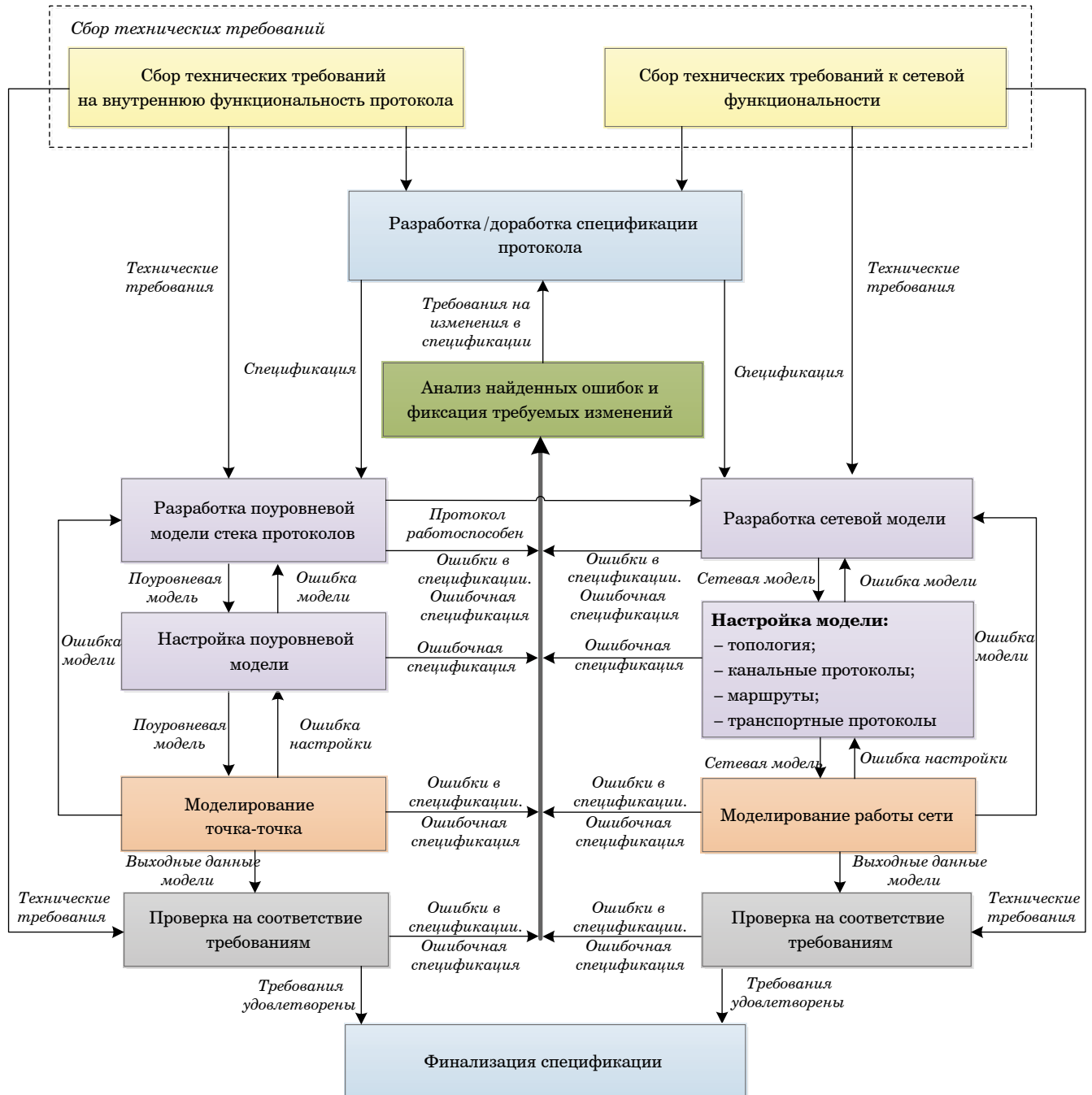
### Методология проектирования коммуникационных протоколов

Современные коммуникационные протоколы становятся все более сложными, повышаются

требования к надежности и скорости передачи данных, энергопотреблению [2]. При этом времени на внедрение отводится с каждым годом все меньше, чтобы успевать за изменениями на рынке. Поэтому нужен современный подход к проектированию протоколов передачи данных, который бы позволил создавать спецификации протоколов, в которых отсутствуют ошибки проектирования, и за меньшие сроки. Для этих целей была создана формализованная методология,

охватывающая все необходимые этапы разработки качественного коммуникационного протокола (рис. 1).

При создании нового подхода к проектированию были проанализированы ранее описанные в литературе способы формального создания протоколов. Методика построения коммуникационных протоколов с параллельными задачами, приведенная в [3], подразумевала трехэтапное построение многофункционального протоко-



• Рис. 1. Методология разработки коммуникационных протоколов  
 • Fig. 1. Methodology for development of communication protocols

ла путем разработки отдельного протокола для каждой функции, объединения и создания эксплуатационных ограничений с целью уменьшения сложности построения. Другой формальный подход применялся в процессе создания протоколов беспроводной связи [4] для мобильных сетей, он основан на задании протоколов в терминах Estelle и применяется для построения аппаратного и программного обеспечения для тестирования, моделирования и симуляции. Следующий метод предназначен для проектирования и верификации структуры протоколов [5], описывает работу над спецификацией и определение межуровневых сервисов. Композиционная техника построения протоколов из [6] предполагает разбиение механизмов протокола на различные составляющие компоненты, упрощает модульное проектирование и проверку. Другие композиционные методы на основе сетей Петри приведены в [7], где созданы формальные модели и методы для проектирования логической структуры сетей. Еще один метод создан в рамках работы [8], где исследовалась применимость алгебры процессов для моделирования протоколов межкристалльной связи для встроенных систем, он свелся к созданию моделей на языке SystemC<sup>SV</sup>. Однако ни один из представленных выше подходов не рассматривает процесс в целом. Только методология проектирования Lotosphere [9] использует полную траекторию проектирования, от формулировки требований до получения проекта реального протокола. Она основана на языке LOTOS, что значительно ее усложняет.

Таким образом, современных подходов, позволяющих формализовать и автоматизировать процесс создания коммуникационных протоколов, нет, либо есть неформализованные инструкции. Показанный на рис. 1 современный подход к проектированию протоколов передачи данных позволит создавать спецификации протоколов, в которых отсутствуют ошибки проектирования, и сократит сроки реализации и финансовые расходы.

Методология начинается со сбора технических требований к будущему протоколу и их анализа. Технические требования разделяются на две группы: требования к внутренним механизмам протокола, таким как качество сервиса, форматы данных, используемые механизмы, а также требования к работе устройств, созданных на базе данного протокола, в рамках технических систем и сетей, например, коммутация, задержки передачи данных и т. п. На основании полученных требований разрабатывается первая версия спецификации будущего протокола. Такой документ, конечно, требует тщательной проверки

и верификации. Для этого применяется моделирование.

На основании разработанной спецификации и требований создаются модели, позволяющие проверить работоспособность протокола. В процессе моделирования создается два разных типа моделей – поуровневая и сетевая [10]. При этом сетевая модель создается только после того, как создан хотя бы один успешный вариант поуровневой модели. Каждый из этих типов моделей решает свои задачи и проверяет работу разных механизмов протокола. После создания моделей необходимо осуществить их настройку, а затем провести тщательное моделирование. При обнаружении ошибки на любом из параллельно идущих этапов необходимо создать отчет об ошибке, отправить его на проверку экспертной группе и остановить работу в параллельной ветке, пока спецификация не будет проверена или уточнена. После анализа найденной ошибки спецификация должна быть доработана и уже исправленной поступить на моделирование. Когда обе команды, занимающиеся моделированием, сообщают, что ошибок больше не обнаружено, результаты моделирования сравниваются с изначальными техническими требованиями. В случае, если требования не удовлетворены, спецификация снова отправляется на доработку. В противном случае, работа над документом завершается, он финализируется и может быть отправлен на дальнейшие этапы проекта, например, аппаратную реализацию. Рассмотрим каждый из описанных этапов подробнее.

### **Сбор технических требований**

Начнем с этапа сбора требований, который проводится экспертной группой. В эту экспертную группу могут входить представители заказчика, разработчики, научные сотрудники, обладающие необходимыми знаниями и информацией по дальнейшему использованию протокола. На данном этапе также могут быть привлечены специалисты по патентному поиску. Этап сбора технических требований запускает разработку протокола и является базовым для всей дальнейшей работы. Основная проблема здесь заключается в том, что необходимо общаться и работать над одним документом людям, занимающимся разными видами работ и обладающим различными знаниями и компетенциями. Эксперты могут использовать терминологию, которая в разных отраслях отличается, поэтому необходимо создавать общий словарь терминов. Другая проблема – это недостаточно понятные требования от самого заказчика и экспертов, поскольку часто бывает так, что они не знают, что хотят получить

в итоге, хотя бы больше, чем на самом деле нужно для реализации проекта, иногда хотят получить что-то абсолютно новое и оставить все смежные программные/аппаратные средства без изменений. Все это усложняет ведение конструктивного диалога и получение итоговых документов с полными техническими требованиями. Полнота таких требований является важным аспектом, поскольку на их основании будет приниматься решение о наличии ошибок в протоколе.

Как видно из рис. 1, технические требования разделяются на два типа, а возможно – и на два документа. Первый тип требований связан с внутренними механизмами протокола, которые относятся к функционированию самого устройства, не выходя за его пределы. Эти требования включают в себя необходимые функции, которые устройство должно выполнять. В качестве примера можно привести требования по механизмам формирования и хранения данных, некоторым из типов обеспечиваемого качества сервиса, методам обеспечения защиты данных, взаимодействия с приложениями внутри устройства и т. п. Второй тип требований связан с функционированием устройства в рамках сети из подобных устройств, реализующих разрабатываемый протокол. Данные требования выходят за пределы работы одного устройства и описывают работу различных типов устройств, таких как простые и сложные узлы, коммутаторы, маршрутизаторы и т. п. Подобные технические требования связаны с механизмами сетевого взаимодействия, реальными числовыми характеристиками протокола, таким как задержка передачи данных, достигаемые скорости. Эти два типа характеристик лучше проверять на разных типах моделей.

### Создание спецификации протокола

После сбора технических требований и разделения их на две основные группы происходит написание спецификации проектируемого коммуникационного протокола, что является неотъемлемой частью процесса разработки. Спецификация разрабатывается группой экспертов, обладающей необходимыми знаниями в области применения будущего протокола и опытом написания спецификаций. Такой документ обычно включает в себя следующие разделы:

- общее описание стека протоколов (или протокола) в соответствии с моделью OSI;
- описание форматов передаваемых данных;
- описание механизмов и алгоритмов протокола в соответствии с уровневой архитектурой;
- описание межуровневых интерфейсов (точек доступа к сервисам);

– примеры применения вышеописанных механизмов или протокола в целом.

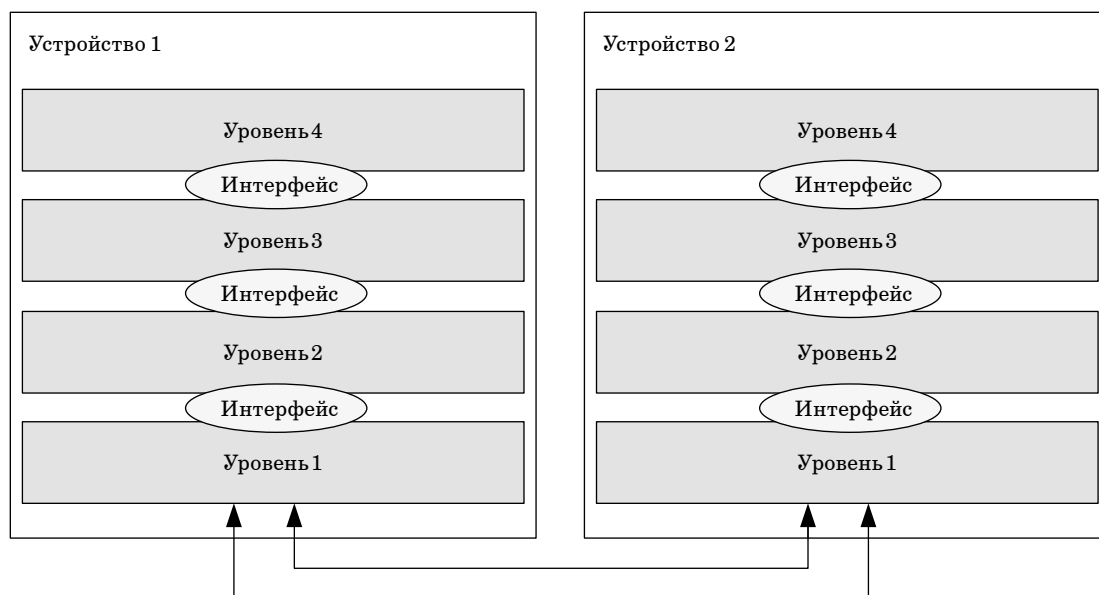
Как только эта задача будет выполнена и начальный проект спецификации готов, документ передается на моделирование. Моделирование осуществляется с целью проверки заложенных алгоритмов и может осуществляться уже в процессе написания спецификации. Для этого на моделирование отдается промежуточный документ, который также проходит проверки, но возвращается обратно на этап доработки, поскольку такая спецификация не будет удовлетворять техническим требованиям.

### Моделирование в процессе разработки протоколов

После создания документа со спецификацией протокола к работе подключаются команды, занимающиеся моделированием. В такие команды входят специалисты, способные составить формальные модели, или программисты, которые создают программные модели на основе описанных алгоритмов протокола. Далее моделирование должно осуществляться по двум практически параллельным веткам: моделирование протокола по слоям и моделирование системы устройств (сетевое моделирование).

Первый метод моделирования – это моделирование стека протоколов по слоям (рис. 2). Для решения этой задачи используется универсальный прием – разбиение (декомпозиция) одной сложной задачи на несколько более простых задач-модулей. Процедура декомпозиции включает в себя четкое определение функций каждого модуля, решающего отдельную задачу, и интерфейсов между ними. В результате достигается логическое упрощение задачи, а кроме того, появляется возможность модификации отдельных модулей без изменения остальной части системы.

Уровни модели при таком подходе полностью соответствуют поуровневой структуре протокола, а интерфейсы между этими уровнями – точкам доступа к сервису, описанным в спецификации. Цель создания подобной модели – это проверка работоспособности протокола – проверка спецификации на наличие ошибок в алгоритмах и механизмах, на возникновение тупиковых ситуаций внутри устройства, работающего по тестируемому протоколу. Таким образом, для осуществления моделирования достаточно полностью описать работу протокола применительно к одному устройству, а для получения результата – организовать передачу данных только между двумя устройствами, поскольку для данной задачи анализа протокола сетевое взаимодействие и механизмы работы в составе более крупной си-



- *Рис. 2. Моделирование протокола по слоям*
- *Fig. 2. Protocol modelling layer-by-layer*

стемы значения не имеют. В некоторых случаях достаточно моделирования и одного устройства. Например, когда нужно проверить только механизм перезагрузки протоколов или механизмов межуровневого взаимодействия внутри стека.

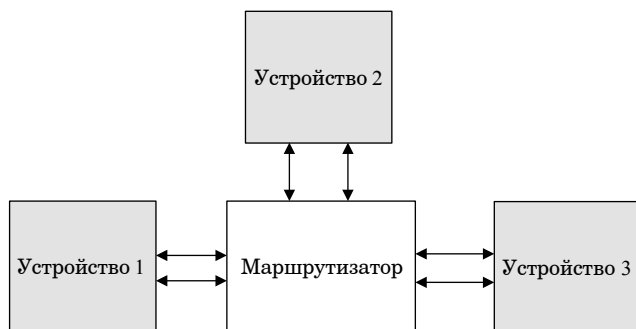
Данный метод моделирования хорош при необходимости тестирования внутренних механизмов протокола на наличие ошибок и их отладки, он позволяет подробно показать и раскрыть функционирование.

Второй способ моделирования – это написание модели взаимодействия устройств, работающих по определенному протоколу, т. е. создание сетевой модели (рис. 3). В этом случае моделируется работа устройств, объединенных в сеть и обменивающихся пакетами данных. При таком подходе не рассматривается взаимодействие составных элементов прикладных процессов внутри устрой-

ства, например, между уровнями стека протоколов, детально не учитываются приложения, работающие в устройстве, не важны, например, механизмы формирования пакетов, инициализации протокола, некоторые механизмы контроля целостности доставки данных. То есть реальный интерес представляет только механизм коммуникации устройств между собой: пересылка пакетов в физической среде, прием или отправка пакета, скорость его доставки, механизмы маршрутизации и т. д. При этом каждый блок модели (узел, канал, коммутатор и т. п.) может быть дублирован и использован неограниченное число раз.

Основным преимуществом этого подхода является то, что некоторые внутренние механизмы не рассматриваются, а значит, не усложняют модель и не делают ее более ресурсоемкой. Это делается при моделировании по слоям. Но рассматривать работу одного устройства при сетевом подходе недостаточно. Для проверки корректности нужно ввести как можно большее число устройств, чтобы увидеть все возможные ошибки, которые могут возникнуть при передаче или маршрутизации.

Сетевое моделирование устройств является более понятным методом для стороннего пользователя, который может использовать модель. Даже человек, подробно не знакомый со спецификацией протокола, может легко разобраться, как сконфигурированы устройства и как их соединить в сеть. Кроме того, при методе моделирования устройств сеть будет использовать однотипные блоки, что значительно ускорит и об-



- *Рис. 3. Моделирование системы устройств*
- *Fig. 3. Modelling of the system of devices*

легчит процесс написания модели и собственно моделирования. При моделировании же по слоям каждый слой индивидуален и выполняет разные функции, которые очень разнообразны и обширны. Значение имеют даже связи между слоями, которые могут быть очень сложными для реализации. Отсюда вытекают и минусы моделирования по слоям. Моделирование по слоям более трудоемко и сложно для реализации. Кроме того, у программиста «связаны руки» в вопросах реализации механизмов, так как они описаны в спецификации протокола. Также моделирование по слоям более ресурсоемко. Но это не лишает его одного основного плюса – оно отлично подходит для моделирования, реально приближенного к действительности.

Для того, чтобы эффективно использовать процесс моделирования коммуникационных протоколов, необходимо использовать оба этих подхода. Только таким образом можно эффективно обнаруживать ошибки в спецификации. С большой вероятностью, этим будут заниматься две разные команды разработчиков, поэтому моделирование можно вести параллельно, что значительно уменьшит время реализации проекта и увеличит число обнаруженных ошибок, несоответствий и неточностей. Однако стоит начать создание сетевой модели только после того, как первая версия модели по слоям уже создана и есть первые результаты, подтверждающие работоспособность основных идей, заложенных в протоколе. Это сэкономит значительное время работы второй команды.

Рассмотрим каждую из веток моделирования в отдельности. Разработка поуровневой модели может вестись не только программными средствами, также могут создаваться формальные модели при помощи известных математических аппаратов. Например, теории сетей Петри, теории автоматов, систем массового обслуживания и т. п. Можно использовать языки программирования, в основе которых лежат формальные методы – например, языки SDL, GPSS и т. п. Настройка такой модели представляет собой задание параметров протокола, а также других свойств, которые должны быть описаны в спецификации.

Для сетевого моделирования зачастую выбираются языки программирования, дающие возможность строить крупные системы с многократным использованием модулей, обеспечением параллельной работы этих модулей. Одним из самых эффективных языков для этих целей является SystemC. Он охватывает широкий спектр областей разработки протоколов, может применяться для проектирования архитектуры, для

аппаратного и программного моделирования, для описания поведения системы и функциональной проверки. Наконец, SystemC поддерживает аппаратное моделирование и детализацию проекта до уровня RTL.

При помощи модели сети на SystemC можно обеспечить задание различных конфигурационных параметров, таких как скорость передачи данных, число узлов и коммутаторов, задержки по времени, таблицы маршрутизации, число портов в коммутаторах и т. п. Также на сетевых моделях есть возможность автоматизировать процесс проектирования топологии сети, прокладки маршрутов, задания различных сетевых свойств.

В процессе настройки моделей могут быть обнаружены ошибки в самой модели, и, как следствие, отправлен запрос на исправление модели. На этапе разработки модели и в процессе моделирования могут быть обнаружены ошибки в спроектированной спецификации. В этом случае формируется подробное описание ошибки, уведомляется команда, параллельно работающая над другой моделью, что необходимо временно приостановить процесс моделирования. Далее собирается экспертная группа, которая оценивает, какие необходимы изменения в спецификации, а затем исправляет ее. Далее вносятся изменения в модели, и спецификация заново отдается на моделирование.

## Заключение

Как только процесс моделирования завершается успешно, ошибок в спецификации больше не обнаружено, результаты моделирования сравниваются с изначальными техническими требованиями. В случае несоответствия спецификация отправляется на исправление или дополнение. Если требования удовлетворены, то в этом случае проектная команда создает финальную версию спецификации и отдает ее на реализацию.

Финальный вид методологии, показанный на рис. 1, был формально верифицирован при помощи теории сетей Петри, а также применен в ряде реальных проектов [11]. Методология может быть признана успешной и может быть рекомендована к применению. Она позволяет формализовать и автоматизировать процессы в рамках проектов по разработке коммуникационных протоколов, а также может быть реализована в программном обеспечении с целью автоматизации.

Проведение процесса разработки коммуникационных протоколов в соответствии с предло-



женной методологией даст возможность сделать разработку более понятной и систематизированной. Предложенная методология поможет решить существующие проблемы проектирования коммуникационных протоколов нового поколения, ускорить и удешевить разработку благодаря распараллеливанию процесса моделирования и обнаружению большинства ошибок проектирования до этапа аппаратной реализации протокола.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Olenev V. L.* Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols // Information-management systems. 2021. № 1. P. 8–16.
2. *Novikov V. M., Platoshin G. A., Sheynin Yu. E.* Network technologies for aviation avionics systems // Problems of avionics. 2018. № 7. P. 1–20.
3. *Lin H., Tarnag C.* An improved method for constructing multiphase communications protocols // IEEE Transactions on Computers. 1993. Vol. 42, № 1. P. 15–26.
4. *Uyar M. U. et al.* A Formal Approach to Development of Network Protocols: Theory and Application to a Wireless Standard. University of Delaware ECE&CIS departments, 2001. 33 p.
5. *Bochmann G. V., El-Fakih K.* Symbolic Refinement of Extended State Machines with Applications to the Automatic Derivation of Sub-Components and Controllers // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 1. P. 1–16.
6. An Integrated Model-Driven Development Environment for Composing and Validating Distributed Real-Time and Embedded Systems / G. Trombetti [et al.] // Model-Driven Software Development. 2005. P. 329–361.
7. *Anisimov N. A., Golenkov E. A., Kharitonov D. I.* Compositional approach to the development of parallel and distributed systems based on Petri nets // Programming. 2021. № 6. P. 30.
8. *Muffke F.* A BetterWay to Design Communication Protocols: PhD thesis. University of Bristol, 2004. 143 p.
9. Architectural Design / C. A. Vissers, M. V. Sinderen, L. F. Ferreira Pires, D. A. Quartel. Springer International Publishing, 2016. 388 p.
10. Co-Modeling of Embedded Networks Using SystemC and SDL / S. Balandin [et al.] // Adoption and Optimization of Embedded and Real-Time Communication Systems. 2013. P. 23–45.
11. *Оленев В. Л.* Методология формализованного проектирования коммуникационных протоколов на основе сетей Петри // Информация и космос. 2022. Т. 4, № 2. С. 1–19.

## REFERENCES

1. *Olenev V. L.* Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols. Information-management systems. 2021;(1):8–16.
2. *Novikov V. M., Platoshin G. A., Sheynin Yu. E.* Network technologies for aviation avionics systems. Problems of avionics. 2018;(7):1–20.
3. *Lin H., Tarnag C.* An improved method for constructing multiphase communications protocols. IEEE Transactions on Computers. 1993. Vol. 42, no. 1, pp. 15–26.
4. *Uyar M. U. et al.* A Formal Approach to Development of Network Protocols: Theory and Application to a Wireless Standard. University of Delaware ECE&CIS departments; 2001. 33 p.
5. *Bochmann G. V., El-Fakih K.* Symbolic Refinement of Extended State Machines with Applications to the Automatic Derivation of Sub-Components and Controllers. IEEE Transactions on Software Engineering. 2021, vol. 1, pp. 1–16.
6. *Trombetti G., Beydeda S., Book M., Gudrip S.* An Integrated Model-Driven Development Environment for Composing and Validating Distributed Real-Time and Embedded Systems. Model-Driven Software Development. 2005, pp. 329–361.
7. *Anisimov N. A., Golenkov E. A., Kharitonov D. I.* Compositional approach to the development of parallel and distributed systems based on Petri nets. Programming. 2001;(6):30.
8. *Muffke F.* A BetterWay to Design Communication Protocols: PhD thesis. University of Bristol; 2004. 143 p.
9. *Vissers C. A., Sinderen M. V., Ferreira Pires L. F., Quartel D. A.* Architectural Design. Springer International Publishing; 2016. 388 p.
10. *Balandin S., Gillet M., Olenev V. L. et al.* Co-Modeling of Embedded Networks Using SystemC and SDL. Adoption and Optimization of Embedded and Real-Time Communication Systems. 2013, pp. 23–45.
11. *Olenev V. L.* Methodology of formalized design of communication protocols based on Petri nets. Information and Space. 2022;4(2):1–19. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Оленев Валентин Леонидович**, кандидат технических наук, доцент, директор центра аэрокосмических исследований и разработок, заведующий кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем института аэрокосмических приборов и систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – бортовые сети, встроенные системы, моделирование, формальная верификация, космические аппараты и техника, технология SpaceWire/SpaceFibre.

Поступила в редакцию 26.10.2022

Поступила после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 30.01.2023

**Olenev Valentin L.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Director at the Aerospace R&D Centre, Head at the Department of Aerospace Computer and Software Systems of the Institute of Aerospace Devices and Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – on-board networks, embedded systems, modeling, formal verification, spacecraft and equipment, SpaceWire/SpaceFibre technology.

Received 26.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 30.01.2023

## Контроллер нечеткой логики для размещения данных в многоуровневом хранилище

**Борис Яковлевич Советов<sup>1</sup>**

bysovetov@mail.ru, orcid.org/0000-0003-3116-8810

**Татьяна Михайловна Татарникова<sup>2</sup>**

✉ tm-tatam@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-6419-0072

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Предлагается алгоритм размещения файлов по уровням иерархического хранилища данных. Суть алгоритма заключается в учете метрик, указывающих на требования к хранению и выбору уровня системы хранения данных, соответствующего выполнению требований. Алгоритм реализуется в виде контроллера нечеткой логики, который интегрируется в работу системы хранения данных до процесса записи нового файла. Показан пример работы контроллера нечеткой логики для файлов с разными метрическими характеристиками.

**Ключевые слова:** большие данные, многоуровневая система хранения данных, требования к хранению, метрики файлов, контроллер нечеткой логики, организация рационального хранения

**Для цитирования:** Советов Б. Я., Татарникова Т. М. Контроллер нечеткой логики для размещения данных в многоуровневом хранилище // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 37–42. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-37-42.

Original article

## Fuzzy logic controller for placing data in multi-level storage

**Boris Ya. Sovetov<sup>1</sup>**

bysovetov@mail.ru, orcid.org/0000-0003-3116-8810

**Tatiana M. Tatarnikova<sup>2</sup>**

✉ tm-tatam@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-6419-0072

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** An algorithm for arranging files by levels of a hierarchical data warehouse is proposed. The essence of the algorithm is to take into account the metrics that indicate the requirements for storage and select the level of the data storage system that corresponds to the fulfillment of the requirements. The algorithm is implemented as a fuzzy logic controller, which is integrated into the operation of the data storage system before the process of writing a new file. An example of the operation of the fuzzy logic controller for files with different metric characteristics is shown.

**Keywords:** big data, tiered data storage system, storage requirements, file metrics, fuzzy logic controller, rational storage organization

**For citation:** Sovetov B. Ya., Tatarnikova T. M. Fuzzy logic controller for placing data in multi-level storage. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(1):37–42. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-37-42.

### Введение

Проблема больших данных в основном обсуждается в контексте их обработки специальными автоматизированными инструментами в целях получения статистики, выполнения анализа, прогнозов и принятия решений. Тем не менее физические процессы хранения больших данных остаются важными и также требуют поиска инструментов автоматизации в условиях огра-

ниченности физических ресурсов. В частности, организация рационального хранения массивов неоднородных данных является одной из таких приоритетных задач [1, 2].

Большие данные, как известно, хранятся в облаке. Рынок облачных вычислений в России растет на 30–40 % в год, при этом наибольшим спросом пользуются сервисы «Приложение как услуга» («SaaS») и «Инфраструктура как услуга» («IaaS»). Причина – устаревание информацион-

ных систем компаний, которые в целях оптимизации аппаратно-программных ресурсов обращаются к облачным решениям [3, 4].

Инфраструктуру облачного хранилища образуют системы хранения данных (СХД). СХД отличаются сложной архитектурой, возможностью объединять носители разной физической природы в сеть передачи данных, наличием отдельного программного обеспечения для управления СХД, технологиями резервного копирования, сжатия и виртуализации [5, 6].

В свою очередь, управление СХД подразумевает не только управление процессами записи-чтения, но и управление объемами – организацию рационального хранения, основанного на важности данных, стоимости их хранения и требованиях к срокам хранения. Несмотря на то, что СХД строятся по иерархическому принципу, автоматизация распределения данных по уровням СХД остается частично решенной: решение о миграции данных между уровнями хранилища принимает администратор СХД [7, 8].

Нами предложен алгоритм распределения данных в СХД с многоуровневой организацией, основанный на контроллере нечеткой логики.

## Материал и методы исследования

Процесс старения (потери актуальности) данных оценивается частотой обращений к ним во времени и описывается гауссовской кривой: число обращений к свежим данным мало, по мере распространения сведений о новых данных число обращений возрастает, затем данные теряют свою актуальность, и число обращений к ним падает и к архивированным данным число обращений существенно меньше пикового [9]. Это свойство используется в создании многоуровневых СХД. Выделяют четыре уровня СХД (рис. 1) [10]:

– уровень 1 (Hi-End) образуют твердотельные накопители SSD (Solid-state drive) и, соответственно, массив дисков из них. Хранение характеризуется высокой стоимостью, надежностью, функциональностью, масштабируемостью. Сюда размещаются критически важные данные с требованиями максимальной (для онлайн-решений) производительности и надежности;

– уровень 2 (Upper Mid-Range) образуют массивы дисков, обмен данных с которыми осуществляется по высокопроизводительным протоколам SAS (Serial Attached SCSI) или FC (Fibre Channel). Хранение характеризуется средней или высокой стоимостью, высокой надежностью, достаточной функциональностью. На этом уровне размеща-

Уровень	Класс данных	Носители
1 Hi-End	Критические приложения	SSD
2 Upper Mid-Range	Важные приложения, виртуализация	FC/SAS
3 Mid-Range	Инфраструктурные сервисы, файловые хранилища	SATA/NL-SAS
4 Entry Level	Резервные копии, архив	Ленточные СХД

• *Рис. 1. Иерархическая модель системы хранения данных*

• *Fig. 1. Hierarchical model of the storage system*

ются важные приложения типа корпоративного почтового сервиса и виртуальные машины, для которых важна высокая производительность;

– уровень 3 (Mid-Range) образуют массивы дисков, подключенных по интерфейсу к SATA (Serial Advanced Technology Attachment) или NL-SAS (Near Line Serial Attached SCSI). Хранение характеризуется средней стоимостью и ограниченной функциональностью. По сути, на этом уровне образуются файловые хранилища, для которых важны большие объемы и энергоэффективность;

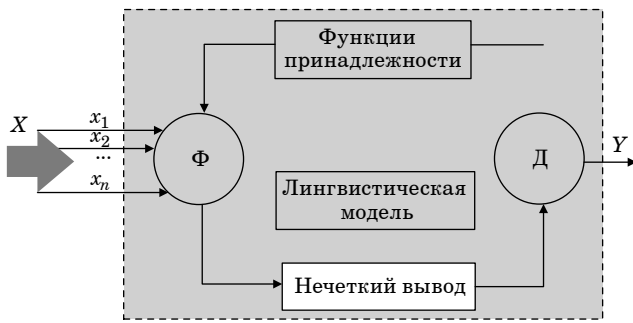
– уровень 4 (Entry Level) образуют ленточные СХД, предназначенные для создания резервных копий и архивов, – отдельные накопители, автозагрузчики, ленточные библиотеки. Хранение характеризуется низкой стоимостью и ограниченной функциональностью.

Таким образом, перед размещением данных каждой единице информации, подлежащей обработке и хранению, будем присваивать определенные метрики, устанавливающие требования к хранению. В их числе – степень доступности (скорость предоставления информации), важность (стоимость потери данных в случае аппаратного и программного сбоя), срок хранения и частота запроса. Метрики, в том числе, возможно выделять из метаданных сохраняемых файлов [11].

Множество файловых метрик будем подавать на вход контроллера нечеткой логики до самого процесса записи нового файла в СХД.

Структуру любого контроллера нечеткой логики (рис. 2) составляют блок фаззификации (Ф), блок функции принадлежности, лингвистическая модель, модуль нечеткого вывода и блок дефаззификации (Д).

Фаззификация – это процесс применения функции принадлежности для интерпретации



• Рис. 2. Структура контроллера нечеткой логики  
• Fig. 2. The structure of the fuzzy logic controller

точных значений переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в нечеткие множества  $z_1, z_2, \dots, z_n$  лингвистической переменной.

Нечеткое множество (НМ) определяется через базовую шкалу  $B$  переменной  $x$  и функцию принадлежности  $\mu(x), x \in B$ , принимающую значения на интервале  $[0, 1]$ .

Лингвистическая переменная определяется набором характеристик некоторого свойства – термов. Например, лингвистическая переменная «Важность данных» задается нечетким множеством {«низкая», «средняя», «высокая»}, в котором каждый терм задается диапазоном значений:

– «низкая» – стоимость потери данных в случае аппаратного и программного сбоя не превышает 30 % активов компании;

– «средняя» – стоимость потери данных в случае аппаратного и программного сбоя не превышает 80 % активов компании;

– «высокая» – стоимость потери данных в случае аппаратного и программного сбоя превышает 80% активов компании.

Функция принадлежности определяет субъективную степень уверенности эксперта в том, что данное конкретное значение базовой шкалы соответствует определяемому нечеткому множеству.

Лингвистическая модель представляет собой совокупность нечетких предикатных правил вида

$$\text{Rule: If } x \text{ is } \mu(x), \text{ Then } y \text{ is } \mu(y), \quad (1)$$

где  $x$  – имя входной переменной;  $y$  – имя переменной вывода;  $\mu$  – заданная функция принадлежности; If <...> – предпосылка правила; Then <...> – заключение правила.

Для каждого правила Rule $_i, i = \overline{1, n}$  вычисляется значение истинности  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$  предпосылки и применяется к заключению, что приводит к формированию нечетких подмножеств для всех термов результирующей лингвистической переменной  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ . Формирование  $i$ -го

нечеткого подмножества  $y_i, i = \overline{1, k}$  выполняется применением операции нечеткой логики «И», согласно которой функция принадлежности выходной переменной  $\mu_i$  «отсекается» по высоте, соответствующей значению  $\alpha_i$ .

Далее все нечеткие подмножества  $y_i, i = \overline{1, k}$  лингвистических переменных объединяются, чтобы сформировать итоговое НМ выходной переменной  $Y$ . Такое объединение называется композицией, для ее реализации используется операция нечеткой логики «ИЛИ».

Дефаззификация – процесс, обратный интерпретации, – получения четкого значения выходной переменной, например, определением центра тяжести итогового множества  $Y$  или центроида площади:

$$y = \frac{\int_{i=\min}^{i=\max} y_i \mu(y_i) dy_i}{\int_{i=\min}^{i=\max} \mu(y_i) dy_i}, \quad (2)$$

где  $y_i$  – результат выходной лингвистической переменной  $Y$ ;  $\mu(y_i)$  – функция принадлежности нечеткого подмножества  $y_i$  после композиции;  $\min$  и  $\max$  – левая и правая границы интервала носителя нечеткого множества выходной переменной.

## Результаты исследования

В определении уровня СХД для размещения нового файла будут участвовать следующие метрики:

– степень доступности, обозначим как НМ  $z_1$ ;  $z_1 = \{\text{«низкая», «средняя», «высокая»}\}$ ;

– важность данных  $z_2 = \{\text{«низкая», «средняя», «высокая»}\}$ ;

– срок хранения  $z_3 = \{\text{«малый», «средний», «большой»}\}$ ;

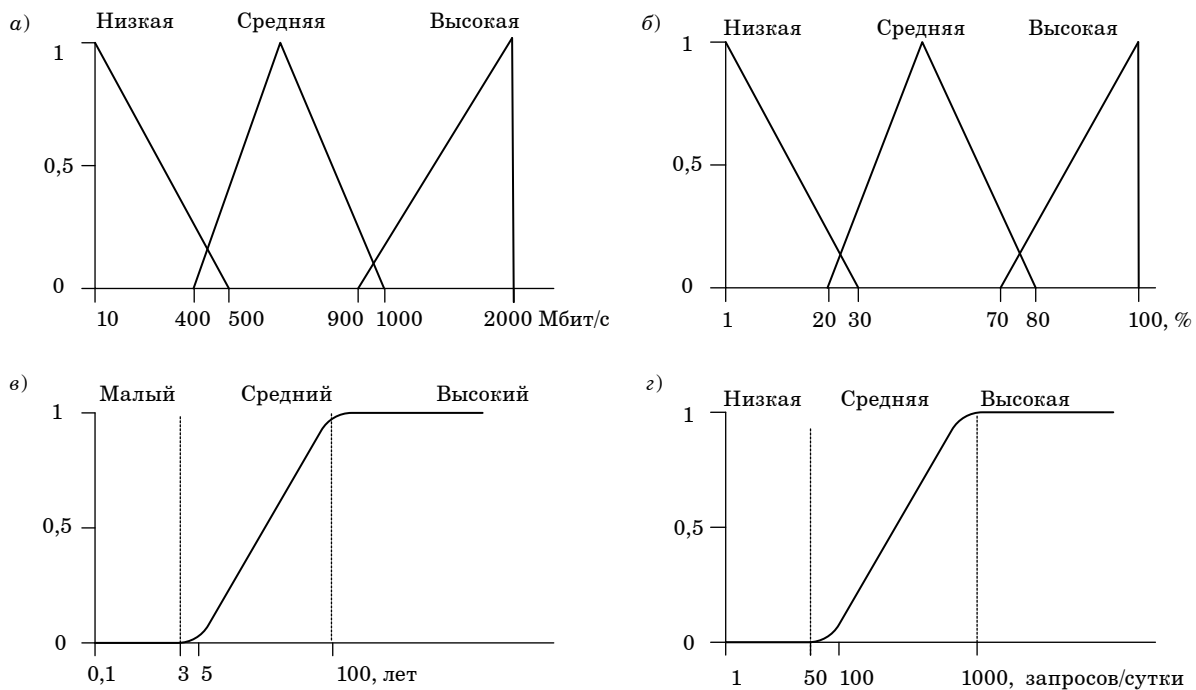
– частота запросов данных  $z_4 = \{\text{«низкая», «средняя», «высокая»}\}$ ;

Введем конечное число функций принадлежности (рис. 3).

Формирование функций принадлежности для фаззификации элементов множеств  $\{z_i\}_{i=\overline{1,4}}$  позволяет осуществить переход к соответствующим нечетким множествам

$$\tilde{z}_i = \mu(z_i), \quad (3)$$

где  $\tilde{z}_i$  – нечеткие числа в интервале  $[0, 1]$ , соответствующие оценкам  $i$ -й метрики  $j$ -го файла.



• *Рис. 3. Функции принадлежности метрических характеристик файлов: а – степень доступности ( $\mu_1$ ); б – важность данных ( $\mu_2$ ); в – срок хранения ( $\mu_3$ ); г – частота запросов данных ( $\mu_4$ )*  
 • *Fig. 3. Membership functions of metric characteristics of files: а – degree of accessibility ( $\mu_1$ ); б – data importance ( $\mu_2$ ); в – storage period ( $\mu_3$ ); г – frequency of data requests ( $\mu_4$ )*

Логическую модель зададим правилом Мамдани:

$$\mu(L) = \max_{k=1,n} \left\{ \min \left[ \mu_1(z_1)_k, \mu_2(z_2)_k, \mu_3(z_3)_k, \mu_4(z_4)_k \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $n$  – число правил логической модели,  $n = 3^4 = 81$  – четыре лингвистические переменные имеют по три термина.

- *Таблица 1. Значения метрических характеристик файлов*
- *Table 1. Values of metric characteristics of files*

Номер файла	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$
1	0,9	0,8	1	0,9
2	0,6	0,7	0,8	0,8
3	0,7	0,6	0,7	0,4
4	0,9	0,8	0,9	0,1
5	0,8	0,7	0,6	0,7
6	0,9	0,3	0,4	0,2
7	0,4	0,5	0,2	0,7
8	0,2	0,8	1	0,9
9	0,3	0,1	0,3	0,3
10	0,6	0,4	0,4	0,7

Введем лингвистическую переменную  $L$  – «уровень СХД», которая определяет результат контроллера нечеткой логики.  $L = \{\text{«Hi-End»}, \text{«Upper Mid-Range»}, \text{«Mid-Range»}, \text{«Entry Level»}\}$ . Значение  $L$  вычисляется в результате дефаззификации выходного нечеткого множества методом центраида площади (2).

Пусть для десяти файлов контроллер нечеткой логики ищет оптимальный уровень СХД и метрики файлов соответствуют данным табл. 1.

- *Таблица 2. Результаты фаззификации*
- *Table 2. Fuzzification results*

Номер файла	Центроид	Уровень хранения
1	0,9	Hi-End
2	0,725	Upper Mid-Range
3	0,6	Upper Mid-Range
4	0,675	Upper Mid-Range
5	0,7	Upper Mid-Range
6	0,45	Mid-Range
7	0,425	Mid-Range
8	0,5	Mid-Range
9	0,25	Entry Level
10	0,525	Upper Mid-Range

Результаты нечеткого вывода для размещения файлов в СХД приведены в табл. 2.

С течением времени значения метрик файлов будут меняться согласно гауссовской кривой в силу потери актуальности данных. Поэтому работа контроллера для уже размещенных в СХД файлов должна периодически запускаться в сроки, установленные администратором СХД. Таким образом будет осуществляться миграция данных по уровням СХД.

## Выводы

1. Разработан новый алгоритм размещения файлов по уровням системы хранения данных в соответствии метриками, указывающими на требования к хранению.

2. Разработанный алгоритм размещения файлов по уровням СХД представляет собой контроллер нечеткой логики определения номера уровня СХД. Требуемый уровень СХД для конкретного файла вычисляется на основе комплексного показателя метрик файлов.

3. Показан пример работы контроллера нечеткой логики по размещению файлов по уровням СХД с раскрытием содержания структурных элементов контроллера – нечетких множеств, функций принадлежности и логической модели.

4. Новый алгоритм распределения файлов по уровням маршрутизации может найти применение при развертывании работы самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей с ячеистой топологией.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Проскуряков Н. Е., Ануфриева А. Ю.* Анализ и перспективы современных систем хранения цифровых данных // Изв. ТулГУ: Техн. науки. 2013. Вып. 3. С. 368–377.
2. *Бурмистров В. Д., Заковряшин Е. М.* Создание хранилища данных для распределенной системы // Молодой ученый. 2016. № 12. С. 143–147.
3. *Buyya R., Broberg J., Goscinski A.* Cloud Computing. Principles and Paradigms. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. 637 p.
4. Recommendation Y.3501: Cloud computing framework and high-level requirements. Geneva: ITU-T, 2013. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11917> (дата обращения: 29.11.2022).
5. Recommendation Y.3510: Cloud computing infrastructure requirements. Geneva: ITU-T, 2013. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3510-201305-S> (дата обращения: 29.11.2022).
6. Recommendation Y.3520: Cloud computing framework for end-to-end resource management. Geneva: ITU-T, 2015. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3520-201509-I> (дата обращения: 29.11.2022).
7. *Farley M.* Building Storage Networks. Osborne: McGraw-Hall, 2001. 576 p.
8. Information Storage and Management. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2016. 544 p.
9. *Kish L. B., Granqvist C. G.* Does information have mass? // Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, № 9. P. 1895–1899.
10. *Sovetov B. Ya., Tatarnikova T. M., Poymanova E. D.* Storage scaling management model // Информационно-управляющие системы. 2020. № 5. С. 43–49. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-5-43-49.
11. *Morville P., Callender J.* Search Patterns: Design for Discovery. O'Reilly Publ., 2010. 192 p.

## REFERENCES

1. Proskuryakov N. E., Anufrieva A. Yu. Analysis and prospects of modern digital data storage systems. Izv. TulGU: Tekhnich. nauki. 2013;(3):368–377. (In Russ.).
2. Burmistrov V. D., Zakovryashin E. M. Creating a data warehouse for a distributed system. Molodoj uchenyj. 2016;(12):143–147. (In Russ.).
3. Buyya R., Broberg J., Goscinski A. Cloud Computing. Principles and Paradigms. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2011. 637 p.
4. Recommendation Y.3501: Cloud computing framework and high-level requirements. Geneva: ITU-T; 2013. Available from: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11917> [Accessed 29 November 2022].
5. Recommendation Y.3510: Cloud computing infrastructure requirements. Geneva: ITU-T; 2013. Available from: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3510-201305-S> [Accessed 29 November 2022].
6. Recommendation Y.3520: Cloud computing framework for end-to-end resource management. Geneva: ITU-T; 2015. Available from: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3520-201509-I>. [Accessed 29 November 2022].
7. Farley M. Building Storage Networks. Osborne: McGraw-Hall; 2001. 576 p.



8. Information Storage and Management. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2016. 544 p.
9. Kish L. B., Granqvist C. G. Does information have mass?. Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, no. 9, pp. 1895–1899.
10. Sovetov B. Ya., Tatarnikova T. M., Poymanova E. D. Storage scaling management model. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy = Information and Control Systems. 2020;(5):43–49. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-5-43-49.
11. Morville P., Callender J. Search Patterns: Design for Discovery. O'Reilly Publ.; 2010. 192 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Советов Борис Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Российской академии образования, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Область научных интересов – моделирование систем, искусственный интеллект.

**Татарникова Татьяна Михайловна**, доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование систем, инфокоммуникационные системы.

Поступила в редакцию 20.12.2022

Поступила после рецензирования 10.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

**Sovetov Boris Ya.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Full Member at the Russian Academy of Education, Professor at the Department of Information Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI».

Research interests – systems modeling, artificial intelligence.

**Tatarnikova Tatiana M.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Head at the Department of Information Technologies and Programming, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – systems modeling, infocommunication systems.

Received 20.12.2022

Revised 10.01.2023

Accepted 30.01.2023

## Формализация требований к характеристикам сети IEEE 802.11 на основе предварительного обследования

Антон Сергеевич Викулов<sup>1, 2</sup>

✉ asv012016@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6671-9267

Александр Иванович Парамонов<sup>1</sup>

alex-in-spb@yandex.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Акционерное общество «Белтел», Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** При проектировании сети IEEE 802.11 важнейшим шагом является постановка задачи, включающая в себя множество требований к характеристикам беспроводной сети, основным среди которых является уровень мощности принимаемого сигнала на покрываемой площади. При этом, применяя специализированные программно-аппаратные комплексы по моделированию и радиообследованию беспроводной сети, инженер оперирует модельными значениями уровня мощности сигнала. Вместе с тем реальное клиентское устройство, работу которого необходимо обеспечить, имеет отличный от измерительной приставки уровень чувствительности, а потому на практике необходимо вносить соответствующую поправку. Такая поправка является одним из основных параметров, которые необходимо определить на этапе предварительного обследования, и именно его определению посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** IEEE 802.11, Wi-Fi, радиообследование, проектирование, требования к покрытию, уровень приема сигнала

**Для цитирования:** Викулов А. С., Парамонов А. И. Формализация требований к характеристикам сети IEEE 802.11 на основе предварительного обследования // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 43–53. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-43-53.

Original article

## Determination of IEEE 802.11 network coverage requirements based on preliminary site-survey

Anton S. Vikulov<sup>1, 2</sup>

✉ asv012016@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6671-9267

Alexander I. Paramonov<sup>1</sup>

alex-in-spb@yandex.ru

<sup>1</sup> The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC «Beltel», St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** While IEEE 802.11 network design process an important step is the problem formulation, which includes many different requirements to the wireless local area network characteristics. One of the most important WLAN characteristics is signal strength. Working within specialized software for design and site survey an engineer is operating with the modelled signal strength level. At the same time the real client device that should work within the environment has different sensitivity than specialized measuring device, and thus a corresponding offset must be taken into consideration. Such offset is one of the key parameters that must be defined during the preliminary site-survey. In the present work its determination will be considered in a more detailed way.

**Keywords:** IEEE 802.11, Wi-Fi, site survey, design, coverage requirements, signal strength

**For citation:** Vikulov A. S., Paramonov A. I. Determination of IEEE 802.11 network coverage requirements based on preliminary site-survey. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):43–53. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-43-53.

### Введение

Популярность сетей стандарта IEEE 802.11 [1] (Wi-Fi) с момента их появления 25 лет назад по настоящее время устойчиво растет. Их области при-

менения обширны и охватывают самые различные отрасли – от развлечений до промышленного производства, а потому их развертывание, модернизация и расширение в настоящий момент можно назвать типовыми инженерными задачами.

Задача построения сети стандарта IEEE 802.11 за более чем два десятилетия существования технологии на рынке в целом уже хорошо отработана отраслью. Существует большое количество достаточно детальных руководств [2–6], посвященных подходам, наиболее часто применяемым в проектной практике. Тем не менее целый ряд вопросов, непосредственно связанных с натурными измерениями, в них детально не рассматривается. К таким вопросам относятся как отдельные элементы измерений радиопокрытия (построения тепловых карт), так и точный сбор исходных данных, необходимых для моделирования. Именно последнему аспекту посвящена данная работа.

Необходимо констатировать, что полевая работа на различных этапах построения беспроводной сети передачи данных (БСПД) на практике может выполняться не только специалистом по беспроводным технологиям. Реальность такова, что современный «инженер-сетевик» – это специалист с широким кругозором, который может решать задачи, связанные с настройкой, отладкой и эксплуатацией инфраструктур совершенно разного типа (и необязательно беспроводного). Это могут быть задачи, связанные с информационной безопасностью, системами хранения данных, унифицированными коммуникациями (IP-телефония), мультимедийной компонентой локальной вычислительной сети (ЛВС) и т. п. Узкоспециализированный эксперт по теме БСПД как технический руководитель не всегда имеет возможность детально контролировать все этапы внедрения беспроводной сети. Кроме того, даже хорошо теоретически подготовленному инженеру иногда может быть удобно иметь компактную инструкцию, посвященную конкретным элементам работы на некоторых отдельных этапах реализации проекта.

Под распределенной сетью IEEE 802.11 будем понимать беспроводную локальную вычислительную сеть, построенную с применением большого числа точек доступа (ТД), каждая из которых организует ячейку покрытия. В данной работе будет рассмотрен один из ключевых подготовительных этапов в процессе развертывания БСПД, а именно – измерения, проводимые при предварительном обследовании площадки, и связанный с этим процесс формализации требований к характеристикам радиопокрытия.

## Стадии проектной работы при развертывании сети IEEE 802.11

В общем случае проектный цикл БЛВС мало отличается от проектной работы над любой другой ИТ-инфраструктурой [7]. Однако на неко-

торые этапы следует обратить особое внимание в контексте особенностей строительства именно беспроводных сетей доступа.

Процесс развертывания сетей Wi-Fi обычно представляется в виде последовательных стадий. Среди основных этапов разработки и внедрения БЛВС выделяют [8] следующие:

- 1) постановка задачи;
- 2) предпроектный осмотр и предварительное радиообследование;
- 3) предиктивное моделирование;
- 4) радиообследование вида «ТД на штанге»;
- 5) оформление рабочей документации;
- 6) развертывание БСПД;
- 7) окончательное радиообследование.

Подробное их рассмотрение выходит за рамки данной работы, тем не менее кратко поясним суть каждого из них.

При постановке задачи (этап 1) необходимо как можно более конкретно ответить на вопрос: «Какую задачу должна выполнять инфраструктура БСПД?». На этом этапе также необходимо ознакомиться с имеющейся документацией по смежным системам – как в случае, если инфраструктура строится «с нуля», так и в случае, если речь идет о реконструкции.

Следующим этапом является предпроектный осмотр (этап 2) с выездом на площадку с целью уточнить имеющиеся исходные данные, а также проверить корректность документов (например, материалов стен согласно архитектурным планировкам). Особенности объекта и вытекающие из них возможные сложности развертывания сети сильно зависят от профиля объекта, будь то гостиница, промышленный цех, складской терминал, аэропорт, открытое пространство или стадион. Однако в общем случае при предпроектном осмотре обращают внимание, например, на следующие особенности:

- наличие зон большого скопления клиентов (конференц-залы, рестораны);
- наличие генераторов мощных радиопомех (микроволновые печи, магнитные краны, трансформаторы и др.);
- наличие поглощающих материалов, не очевидных из архитектурных планов (например, гипсокартонные поверхности могут быть армированы стальной сеткой);
- особенности требуемой кабельной инфраструктуры;
- необходимость использовать источники питания переменного тока вместо технологий 802.3at/802.3af (PoE/PoE+);
- необходимость развертывания дополнительного функционала, например, IPS или LBS [9].

Кроме того, на данном этапе выполняется предварительное радиообследование. Оно включает в себя несколько возможных действий:

- в случае наличия БСПД на площадке (например, если речь идет о модернизации) необходимо собрать максимум информации о характеристиках существующей инфраструктуры. Это поможет соотнести постановку задачи с реальностью, задав «точку отсчета» для проекта БСПД;

- для максимально точного предиктивного моделирования на следующем этапе необходимо измерить затухание в типовых препятствиях, встречающихся на площадке;

- для наиболее точного соответствия предиктивной модели возможностям фактически применяемых клиентских устройств (КУ) необходимо наиболее точно собрать информацию об их характеристиках.

После сбора всей возможной информации можно приступать к предиктивному моделированию (этап 3). При этом исходными данными являются:

- планы объекта с указанием материалов стен;
- планы структурированной кабельной системы;
- области на планах, где возможно/запрещено устанавливать точки;

- области на планах, где требуется/не требуется Wi-Fi-покрытие;

- техническое задание на характеристики радиопокрытия, включающее в себя требования к уровню приема сигнала, соотношению «сигнал/шум» (ОСШ) и пропускной способности, основанные на выдержках из корпоративных стандартов или требований используемого клиентского оборудования;
- предполагаемый перечень клиентских устройств будущей БЛВС.

Результатом этапа 3 является предиктивная модель покрытия, содержащая сведения о местоположениях ТД и их характеристиках, а также дающая оценку характеристик БСПД исходя из заданных ранее требований.

На этапе 4 происходит проверка предиктивной модели. Точка доступа заданного в модели типа последовательно устанавливается в каждое из расчетных местоположений с последующим измерением характеристик сигнала от нее. Таким образом формируется фактическая картина распространения сигнала по целевой площади. Такой вид обследования называется «ТД на штанге», или «Access point on a stick» (APoS). При этом целями являются уточнение предиктивной модели радиопокрытия в реалиях объекта и минимизация различных допусков, сделанных при моделировании. В результате этапа 4 оформляется отчет, содержащий все важные сведения о задаче по построению БСПД и предлагаемом ее

решении. В зависимости от необходимости, это может быть как общий отчет по этапам 3 и 4 (моделированию и натурному радиообследованию), так и два отдельных документа.

Далее, на этапе 5, оформляется рабочая документация (РД) на БСПД. Это может быть как отдельный том РД, так и часть раздела ЛВС в целом. При этом к документации прикладываются отчеты о результатах этапов 3–4 работы.

На этапе 6 происходит развертывание БСПД, т. е. монтаж кабельных трасс, точек доступа, антенн и сопутствующих компонентов.

На этапе 7 при окончательном радиообследовании измеряются характеристики всей развернутой БСПД и строятся необходимые тепловые карты. Задача данного этапа – это ответ на вопрос: «Соответствуют ли характеристики БСПД тем требованиям, которые были заданы и обоснованы ранее?».

Работы на этапах 2–4 и 7 выполняются с применением специализированного программно-аппаратного комплекса, такого как Ekahau Pro.

Еще раз обратим внимание на важность измерений на этапе 2 – предварительном обследовании площадки, поскольку именно эти сведения самым непосредственным образом влияют как на качество предиктивной модели, так и на общее понимание работоспособности будущей БСПД автором решения и заказчиком. Именно поэтому далее рассмотрим несколько аспектов, связанных с предварительным обследованием и собираемыми при этом данными.

### **Задача формулировки требований к характеристикам БСПД**

Основным требованием к работоспособности БСПД является отношение ОСШ. Так, например, в случае дополнения стандарта IEEE 802.11ax, при канале шириной 20 МГц (канал типа HE20), при одном пространственном потоке, соответствие между ОСШ и скоростью передачи в канале на заданной схеме модуляции и кодирования (MCS) определяется из таблицы 27–49 стандарта [10].

Скорость передачи в канале далее делится на всех одновременно активных клиентов с поправкой на накладные расходы уровней L1-L4 модели OSI, что обеспечивает реальную пропускную способность для передачи полезных данных. Отметим, что для всех режимов работы (включая менее подверженный данному эффекту IEEE 802.11ax) зависимость от числа активных КУ нелинейна, и при превышении некоторого числа КУ происходит заметное падение общей пропускной способности [11].

Принимая фоновый шум в отсутствие помех постоянным на некотором фиксированном уровне, возможно сформулировать требования к уровню мощности принимаемого сигнала (уровню приема). Именно уровень приема сигнала (и его производные характеристики, такие как уровень приема сигнала от дополнительной ТД) является ключевым параметром. Это связано с особенностями измерения характеристик среды радиомодулем IEEE 802.11, который не может надежно измерить ОСШ, и единственным ориентиром является уровень мощности принимаемого сигнала. Потому именно эта величина, а не ОСШ, является на практике главной характеристикой, определяющей требования к радиопокрытию БСПД.

Принимая консервативное значение уровня фонового шума в  $-85$  дБм, рассмотрим несколько показательных примеров:

1) минимально возможная скорость передачи, на которой можно гарантировать работу (т. е. второй снизу MCS) со скоростью в канале, равной  $17,2$  Мбит/с, которая требует для работы ОСШ  $= 10$  дБ, соответствует требованию в  $-75$  дБм к уровню приема сигнала, которое обеспечивает минимально возможное качество работы КУ на ТД. Поэтому такой уровень сигнала можно назвать «минимально работоспособным». На практике же такое требование применять нет смысла;

2) достаточно часто формулируется требование обеспечить уровень приема в  $-67$  дБм, которое уже является компромиссом. При уровне шума в  $-85$  дБм это условие соответствует ОСШ, равному  $17$  дБ. Здесь скорость в канале может достигать порядка  $50$  Мбит/с, что будет соответствовать чуть большим значениям пропускной способности в расчете на одно одновременно активное КУ. Такой уровень приема при не слишком плохой чувствительности клиентского устройства можно назвать «приемлемым»;

3) допустим теперь, что за требуемый уровень приема сигнала в сети Wi-Fi принимается  $-60$  дБм. При уровне шума в  $-85$  дБм это дает ОСШ  $= 25$  дБ, что даже при сниженной чувствительности клиентского устройства дает ему возможность работать на средних (а в ряде случаев и повышенных) скоростях, допускаемых дополнением стандарта 802.11ax. Отметим, что для более старых вариантов стандарта 802.11n/ac уровень приема  $-60$  дБм соответствует максимальной и второй сверху скорости канала соответственно. Такой уровень приема можно условно назвать «хорошим», поскольку возможно гарантировать неминимальную (до  $5$  Мбит/с) пропускную способность в расчете на каждое КУ при общем числе одновременно активных КУ порядка  $10-15$  штук на одну ТД;

4) более высокие требования к уровню приема сигнала для сетей IEEE802.11n/ac использовались редко, кроме, быть может, нечастых случаев прямой необходимости использования агрегированных каналов HT40/VHT40. Что касается сетей IEEE802.11ax, то в них требования уровня покрытия от основной ТД в  $-55$  дБм и выше на сегодняшний день уже вполне актуальны, ввиду наличия более требовательной к ОСШ модуляции 1024-QAM.

Модельный уровень приема сигнала  $P_r$  определяется чувствительностью КУ, мощностью  $P_{rad}$  передатчика радиомодуля ТД, коэффициентом усиления антенны ТД  $G_t$  и антенны КУ  $G_r$ , потерями в антенном кабеле  $L_{cab}$ , а также затуханием сигнала  $L$  в процессе его распространения. Нормативным ограничением сверху является предельная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ, EIRP), определяемая регулятором. Связаны они следующим образом:

$$EIRP = P_{rad} + G_t - L_{cab}; \quad (1)$$

$$P_r = EIRP + G_r - L. \quad (2)$$

В России ЭИИМ для частот диапазона  $2,4$  ГГц должна быть менее  $20$  дБм, а для частот  $5$  ГГц – менее  $23$  дБм. На практике же при обосновании реально используемых при конфигурировании БСПД значений  $P_{rad}$  инженер чаще всего стремится сделать это значение минимально возможным как с целью минимизировать размер зоны покрытия отдельной ТД, так и с целью обеспечить «запас» по мощности для контроллера, управляющего БСПД. Таким образом, задача состоит в том, чтобы при оговоренных условиях (уровень фонового шума, предельная ЭИИМ, предельная  $P_{rad}$ ) определить требуемый уровень приема от основной (primary) и дополнительной (secondary) ТД в каждой точке зоны покрытия. Сложностью является не просто выбор требуемой MCS, работа на которой предполагается основной, но и корректный учет особенностей площадки, решаемой задачи, а также возможностей клиентских устройств.

Правильный выбор требуемого уровня приема с опорой на возможности КУ является залогом корректного решения проектной задачи с минимальными затратами на оборудование и дальнейшую эксплуатацию БСПД.

## Анализ площадки, определение характеристик клиентских устройств

В большинстве случаев целевая площадка представляет собой неоднородную, с точки зрения требований к БСПД, планировку. Казалось бы,

сложностей быть не должно – есть клиентское устройство, значит, необходимо обеспечить прием везде, где оно может находиться. Однако в реальности задача может распадаться на отдельные случаи даже в рамках одной площадки. Так, например, на логистическом терминале, кроме зоны склада, могут быть офисные пространства. А, например, в гостинице, кроме номерного фонда, могут быть конференц-зал, бассейн и прилегающая уличная территория. Очевидно, что в рассматриваемых примерах тип клиентских устройств, равно как и схема их использования, будут существенно различаться, что может влиять на требования к БСПД в отдельных зонах покрытия.

Таким образом, необходимые для сбора данные могут быть представлены в виде таблицы. Для примера составим такую таблицу для случая логистического терминала (табл. 1). Для любых других случаев ее вид будет аналогичен.

В табл. 1 приведены две зоны покрытия – зона складского терминала (зона хранения) и офис. В графе «Требования к БСПД» формулируются особенности эксплуатации БСПД в данной зоне с точки зрения пользователя. В графе «Модель КУ» необходимо перечислить имеющиеся в данный момент и планируемые к эксплуатации устройства, которые будут типичными для данной зоны покрытия. В зоне склада основными КУ являются терминалы сбора данных (ТСД) различных моделей, а также бортовые компьютеры (БК) на погрузочную технику. В офисной зоне КУ представлены корпоративными персональными компьютерами (ПК) и мобильными телефонами *Samsung*.

Очевидно, что на этапе построения предиктивной модели для различных зон покрытия могут быть применены различные подходы в построении БСПД. В данном примере, наиболее вероятно, для офисной зоны будут использоваться

ТД потолочного исполнения со встроенными все-направленными антеннами, тогда как для зоны склада наиболее логично применить ТД с внешними направленными антеннами с их установкой на большой высоте (порядка 10 м) [12].

Охарактеризовав площадку, необходимо перейти к анализу возможностей клиентского устройства. Это можно сделать как с использованием документации на устройство (технического паспорта, сертификата о соответствии, документации производителя), так и с помощью самого устройства. В последнем случае необходимо обратиться к вариантам его настройки с точки зрения встроенного в него программного обеспечения (ПО). Кроме того, в ряде случаев может быть оправдан прямой анализ служебного трафика от устройства с помощью анализатора протокола IEEE 802.11. Такая необходимость может возникнуть в случае сомнений в корректности настроек или противоречивости документации, а такое, увы, не редкость.

Собранные таким образом данные можно представить в табличном виде. В табл. 2 приведены такие сведения, соответствующие нашему примеру в случае зоны покрытия склада.

Рассмотрим приведенные в табл. 2 сведения более подробно:

1) число КУ указанной модели (типа) с позиции их расчетного числа при фактической эксплуатации определяется с учетом плана развития инфраструктуры;

2) последнее поддерживаемое дополнение стандарта IEEE 802.11 с точки зрения РНУ. Им могут быть 802.11(legacy), 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax;

3) частотный диапазон, где возможна работа радиомодуля КУ: 2,4 и (или) 5 ГГц.

Важно отметить, что в зависимости от регуляторного домена каждое отдельное КУ может иметь свой набор возможных частотных каналов.

- Таблица 1. Зоны покрытия БСПД на площадке логистического терминала
- Table 1. WLAN coverage zones for logistics terminal area

Зона покрытия	Требования к БСПД	Номер КУ	Модель КУ
Склад	При работе в зоне склада требования к пропускной способности невысоки и не превышают 1–2 Мбит/с на одно КУ. Однако необходимо обеспечить надежный хендвер, поскольку КУ в процессе работы постоянно перемещаются	1	ТСД M3 Mobile SL20
		2	ТСД Zebra MC9090
		3	ТСД Zebra MC9190
		4	ТСД Zebra MC92N0
		5	ТСД Zebra MC32N0
		6	БК Zebra VH10
Офис	Для работы в офисном режиме требуется обеспечить высокую пропускную способность БСПД – не менее 10 Мбит/с в расчете на одно КУ. КУ преимущественно стационарны	7	ПК Dell 5590
		8	ПК Dell 5490
		9	Samsung A52

- Таблица 2. Возможности клиентских устройств
- Table 2. Client device capabilities

Номер КУ	Модель КУ	Последнее дополнение стандарта IEEE 802.11	Диапазон	Поддержка КУ дополнений стандарта				«Mission Critical»
				802.11r	802.11w	802.11k	802.11v	
1	M3 Mobile SL20	802.11n/ac	Оба	Да	Нет	Да	Да	Да
2	Zebra MC9090	802.11a/b/g	Оба	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
3	Zebra MC9190	802.11a/b/g	Оба	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
4	Zebra MC92N0	802.11a/b/g/n	Оба	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
5	Zebra MC32N0	802.11a/b/g/n	Оба	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
6	Zebra VH10	802.11a/b/g/n	2,4 ГГц	Нет	Нет	Нет	Нет	Да

Тогда выбор частотного плана будет определяться возможностями КУ с наименьшим общим набором поддерживаемых каналов.

1. Полезной информацией являются данные о поддержке таких дополнений стандарта, как:

– 802.11r (fast BSS transition) – обеспечивает клиенту быстрый переход между BSS, снижая число необходимых служебных кадров при хендвере;

– 802.11v (network management) – обеспечивает обмен данными о сетевой топологии;

– 802.11k (radio-resource management) – обеспечивает управление радиоресурсами, дающее возможность КУ выбирать наилучшую ТД;

– 802.11w (protected management frames) – обеспечивает защиту служебного трафика, подлинность которого без внедрения данного дополнения не проверяется.

2. Пометка «Mission critical» говорит о критичности работы данного устройства для бизнес-задачи.

### Смещение чувствительности клиентского устройства

При предиктивном моделировании радиопокрытия на третьем и последующих этапах проектной работы должно быть сформулировано требование к уровню приема сигнала от основной ТД для всей зоны покрытия. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Когда идет речь об уровне мощности принимаемого приема сигнала, чаще всего подразумевается, что речь идет о расчетном уровне сигнала, который можно проверить измерением. Это может быть как модельный уровень сигнала, используемый при предиктивном моделировании, так и измеренный уровень в процессе натурных радиоизмерений, проводимых на любом

из этапов проектной работы, где это необходимо. Обычно, например, при работе в специализированном программном пакете EkaHau Pro, уровень приема  $P_r$ , являющийся результатом моделирования, соответствует в рамках сделанных при моделировании допущений значению, измеренному при натурном обследовании с использованием специализированной измерительной приставки. Однако необходимо принимать во внимание тот факт, что чувствительность клиентского устройства, равно как и его алгоритм расчета значения уровня приема сигнала, могут отличаться (и чаще всего отличаются) от значения, соответствующего измерительной приставке программно-аппаратного комплекса (далее – приставка). А поскольку целью работы БСПД является именно обеспечение работы клиентского устройства, то необходимо внести соответствующую поправку.

На практике уровень мощности принимаемого сигнала на стороне КУ  $P_{client}$  будет определяться как:

$$P_{client} = P_r - L_{offset}, \quad (3)$$

где  $L_{offset}$  – разница (смещение) между уровнем приема клиента и приставки, определяемая разницей чувствительности их радиомодулей, дБ.

Поэтому для определения собственно требования клиента к уровню сигнала необходимо определить величину  $L_{offset}$ . Существуют разного рода оценки этого значения для типовых КУ (или даже конкретных моделей), приводимые, в том числе, и на различных интернет-ресурсах [13], тем не менее наиболее точной будет оценка этого параметра, сделанная на реальном устройстве.

Таким образом, при измерениях с целью сохранить баланс между их объективностью, трудоемкостью и минимизацией погрешности результата предлагается следующий подход.



1. Определяется зона покрытия, где будет проводиться измерение. Выделяются ТД, сигналы которых будут фиксироваться. Клиентское устройство выводится в режим индикации уровня мощности принимаемого сигнала (дБм). Измерительная приставка подготавливается для измерений. Определяется набор точек пространства зоны покрытия, где будут проходить измерения. Таких местоположений должно быть не менее пяти. Желательно при этом, чтобы они были различны как по своему окружению, так и по уровню приема сигнала рассматриваемой ТД.

2. При каждом измерении одновременно фиксировать два значения уровня мощности принимаемого сигнала – на КУ ( $P_{client}$ ) и на приставке ( $P_r$ ). В каждом местоположении необходимо зафиксировать последовательно не менее пяти пар значений – на устройстве и на приставке, для каждого из двух частотных диапазонов. Ввиду особенностей работы радиомодуля 802.11, значения должны фиксироваться с частотой не чаще одного раза в минуту. Кроме того, необходимо обращать внимание, что, поскольку для КУ часто нужно продолжительное время адаптации к условиям среды, для каждого нового местоположения начинать запись значений нужно по прошествии некоторого времени с момента включения КУ, когда выводимые значения будут относительно стабильными.

Значение смещения для каждого отдельного измерения определяется как:

$$L_{offset} = P_r - P_{client}. \quad (4)$$

Результаты для каждого КУ заносятся в таблицу. В табл. 3 для примера заполнены эти дан-

- Таблица 3. Измерения смещения чувствительности КУ (ТСД M3 Mobile SL20)
- Table 3. Sensitivity offset measurements for M3 Mobile SL20

Местоположение	Смещение чувствительности, дБ	Ряд измерений				
		1	2	3	4	5
№ 1	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	4	2	-5	-1	3
	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ	10	10	8	9	12
№ 2	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	4	1	-5	-3	4
	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ	10	13	7	8	11
№ 3	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	5	-2	-4	9	7
	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ	10	14	11	16	14
№ 4	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	4	2	5	2	2
	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ	14	15	8	16	14
№ 5	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	3	6	3	7	4
	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ	8	10	9	9	11

ные для одной из моделей ТСД, соответствующие измерениям, сделанным на одном из крупных складских терминалов в Санкт-Петербурге. Измерения  $P_{client}$  производили относительно измерительной приставки EkaHau Sidekick-1 (значения  $P_r$ ). Приборная погрешность в таком случае будет во всех случаях одинакова и составлять 1 дБ.

## Анализ результатов измерений

Так как для каждого из частотных диапазонов имеется пять выборок, прежде всего необходимо проверить равенство этих выборок. В случае сравнения пары выборок, это можно сделать с помощью  $t$ -критерия [14].

В нашем случае для одновременного сравнения нескольких независимых выборок малого размера будем использовать критерий Крускала – Уоллиса [15]. В этом случае выборки будут состоять из величин смещения чувствительности  $L_{2G\_offset}$  (диапазон 2,4 ГГц) и  $L_{5G\_offset}$  (диапазон 5 ГГц).

Рассмотрим результат косвенных измерений как объединенную выборку значений смещения чувствительности КУ, выполненную для каждого из 25 измерений (пять серий по пять измерений).

В этом случае обе объединенные выборки для двух частотных диапазонов имеют вид, показанный в табл. 4.

Нулевой гипотезой  $H_0$  является гипотеза о равенстве выборок, т. е. между выборками существуют лишь случайные различия по уровню исследуемого сигнала. Эмпирическое значение критерия Крускала – Уоллиса рассчитывается согласно следующей формуле:

$$H_{эмп} = \frac{12}{N(N+1)} \sum_i \frac{T_j^2}{n_j} - 3(N+1), \quad (5)$$

- Таблица 4. Объединенные выборки измерений смещения чувствительности M3 Mobile SL20
- Table 4. Combined samplings of sensitivity offset for M3 Mobile SL20

Диапазон, ГГц	Значение $L_{offset}$ , дБ									
	4	2	-5	-1	3	4	1	-5	-3	4
2,4	5	-2	-4	9	7	4	2	5	2	2
	3	6	3	7	4					
	10	10	8	9	12	10	13	7	8	11
5	10	14	11	16	14	14	15	8	16	14
	8	10	9	9	11					

где  $N$  – общее число значений в объединенной выборке;  $T_j$  – сумма рангов в  $j$ -й выборке;  $n_j$  – число значений в  $j$ -й выборке.

Нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости  $\alpha$ , если  $H \geq H(\alpha)$ , где  $H(\alpha)$  – критическое значение.

Для частотного диапазона 5 ГГц в рассмотренном примере эмпирическое значение критерия Крускала – Уоллиса соответствует  $H_{эмп} = 4,81$ , тогда как критическое значения для  $k = 5$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  составляет 9,48. Поскольку условие не выполнено, то нулевая гипотеза принимается и выборки можно считать равными. Аналогично для частотного диапазона 2,4 ГГц  $H_{эмп} = 5,03$ . Поскольку условие также не выполнено, то нулевая гипотеза также не отвергается.

В таком случае, рассматривая объединенную выборку для каждого из частотных диапазонов, можно оценить среднюю величину смещения и ее погрешность.

Поскольку измерения в  $m$  различных местоположениях проведены в различных условиях, они относятся к неравноточным измерениям, а потому их результаты необходимо соотносить друг с другом с привлечением соответствующих методов.

Результатом измерения будет средневзвешенная оценка:

$$\bar{L}_{offset} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{n_j}{\sigma_j^2}} \sum_{j=1}^m \frac{\langle L_{offset} \rangle n_j}{\sigma_j^2}, \quad (6)$$

где  $n_i$  и  $\sigma_i^2$  – соответственно объем и дисперсия  $i$ -й выборки.

Среднеквадратичное отклонение средневзвешенного значения:

$$\sigma_{\bar{L}_{offset}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{n_j}{\sigma_j^2}} \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{\langle L_{offset} \rangle n_j}{\sigma_j^2}}}$$

Доверительный интервал определяется по распределению Стьюдента:

$$\Delta \langle \bar{L}_{offset} \rangle = t_{an} \sigma_{\bar{L}_{offset}}, \quad (7)$$

где  $t_{an}$  – коэффициент Стьюдента.

Для доверительной вероятности 0,95 и числе измерений  $n = 5$ ,  $t_{an} = 2,77$ .

Таким образом, с учетом приборной погрешности, получаем среднее значение смещения погрешности каждого клиентского устройства для двух диапазонов (табл. 5).

- Таблица 5. Характеристики КУ для зоны склада
- Table 5. Client device characteristics for logistics terminal

Номер КУ	Модель КУ	$L_{2G\_offset}$ (2,4 ГГц), дБ	$L_{5G\_offset}$ (5 ГГц), дБ
1	M3 Mobile SL20	(3,1±2,3)	(10,1±2,2)
2	Zebra MC9090	(-0,1±2,1)	(13,8±2,1)
3	Zebra MC9190	(5,8±2,2)	(10,1±2,3)
4	Zebra MC92N0	(0,5±2,3)	(9,9±2,2)
5	Zebra MC32N0	(3,4±2,2)	(5,5±2,0)
6	Zebra VH10	(-6,1±2,4)	н/д

Таким образом, теперь обладая всей полнотой информации, прежде чем переходить непосредственно к определению требования к модельному уровню мощности приема сигнала, необходимо выбрать клиентское устройство.

### Выбор целевого клиентского устройства

Среди всех рассмотренных клиентских устройств, которые будут применяться на площадке, необходимо теперь для каждой зоны покрытия выбрать то устройство, исходя из обеспечения работы которого должна рассчитываться БСПД. Принятие проектного решения о выборе целевого клиентского устройства – это сложная задача многокритериального выбора, и решать ее можно с различных позиций.

Рассматривать будем только те устройства, для которых положителен (true) параметр «Mission Critical». В рассматриваемом примере склада таковыми являются все перечисленные КУ.

В целом выбор целевого КУ обычно рекомендуется делать исходя из принципа «Most Important, Least Capable», т. е. исходя из соображений наибольшей важности для работы при минимальных функциональных возможностях КУ [16]. На практике такой подход становится выбором наиболее старого устройства с максимальным значением  $L_{offset}$ :

Кроме того, дополнительными критериями могут быть:

– поддержка 5 ГГц. В случае, если параметр положителен (true) для всех рассматриваемых устройств, возможно проектирование БСПД для покрытия 5 ГГц. В противном случае, основным

частотным диапазоном должны быть каналы ISM (2,4 ГГц);

– доля устройства среди их общего числа. Число устройств не является оценкой само по себе, но может стать причиной для возможного отказа от использования данного устройства в пользу более предпочтительной альтернативы;

– моральное устаревание устройства, которое может быть причиной постановки вопроса о необходимости его замены на более современное и, как следствие, исключения его из рассмотрения. В нашем примере такими КУ являются № 2 (Zebra MC9090) и 3 (Zebra MC9190).

Также отметим, что выбор КУ со слишком высоким значением  $L_{\text{offset}}$  может потребовать избыточного увеличения стоимости решения БСПД, что может оказаться аргументом в пользу отказа от использования такого КУ. В любом случае принятие такого решения носит комплексный характер, и инженер должен принимать во внимание многие факторы.

## Выводы

1. Рассмотрен жизненный цикл проекта по проектированию и внедрению беспроводной сети передачи данных с акцентом на натурные измерения на площадке.

2. Показана важность предварительного радиообследования площадки с позиции анализа возможностей клиентских устройств.

3. Показана примерная рекомендуемая методика измерения смещения чувствительности клиентского устройства относительно измерительного модуля применяемого программно-аппаратного комплекса.

4. Отмечена сложность принятия решения о целевом клиентском устройстве, параметры которого должны быть заложены в процесс проектирования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11-2020. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems // Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE. 2021. Doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
2. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education // Cisco Systems. 2017. URL: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/solutions/industries/docs/education/cisco\\_wlan\\_design\\_guide.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf) (дата обращения: 10.11.2022).
3. High Density Wi-Fi Design Principles // Aerohive Networks. 2012. URL: <https://dokumen.tips/documents/aerohive-whitepaper-hi-density-principles.html> (дата обращения: 10.11.2022).
4. High Density Wi-Fi Deployment Guide. Best Practices Design Guide // Ruckus Wireless. 2018. URL: <https://support.ruckuswireless.com/documents/1345-best-practices-design-guide-high-density-wi-fi-ap-deployment> (дата обращения: 10.11.2022).
5. Aruba High Density Wireless Networks for Auditoriums. VRD // Aruba Networks. 2010. URL: <https://www.arubanetworks.com/vrd/HighDensityVRD/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=Chap1.html> (дата обращения: 10.11.2022).
6. Best Practices for High Density Wireless Network Design in Education and SMB. WP // Netgear. 2013. URL: [https://www.netgear.com/images/pdf/High\\_Density\\_Best\\_Practices.pdf](https://www.netgear.com/images/pdf/High_Density_Best_Practices.pdf) (дата обращения: 10.11.2022).
7. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневецкий, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
8. Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ подходов к организации радиопокрытия в сетях Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информ. технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6, № 3. С. 38–51.
9. Викулов А. С., Парамонов А. И. Функциональные особенности сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информ. технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6, № 2. С. 49–61.
10. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11ax-2021. IEEE Standard for Information Technology // Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. IEEE. 2021. Doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.
11. Meru Networks Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. 2012. 103 p.
12. Викулов А. С., Парамонов А. И. Оценка эффектов межканальных помех в сетях IEEE 802.11 для различных антенных конфигураций в задаче радиопокрытия промышленных объектов // Радиотехн. и телекоммуникац. системы. 2020. № 3. С. 15–36.
13. RSSI Compared. URL: <https://rssicompared.com/devices> (дата обращения: 10.11.2022).

14. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей: компьютерный подход / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. Новосибирск, 2011. 890 с.
15. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.
16. ECSE Design Course Agenda. URL: [https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/06/EKH\\_ECSE-Design-Agenda.pdf](https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/06/EKH_ECSE-Design-Agenda.pdf) (дата обращения: 10.11.2022).

## REFERENCES

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11-2020. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE. 2021. Doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
2. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems. 2017. Available from: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/solutions/industries/docs/education/cisco\\_wlan\\_design\\_guide.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf) [Accessed 10 November 2022].
3. High Density Wi-Fi Design Principles. Aerohive Networks. 2012. Available from: <https://dokumen.tips/documents/aerohive-whitepaper-hi-density-principles.html> [Accessed 10 November 2022].
4. High Density Wi-Fi Deployment Guide. Best Practices Design Guide. Ruckus Wireless. 2018. Available from: <https://support.ruckuswireless.com/documents/1345-best-practices-design-guide-high-density-wi-fi-ap-deployment> [Accessed 10 November 2022].
5. Aruba High Density Wireless Networks for Auditoriums. VRD. Aruba Networks. 2010. Available from: <https://www.arubanetworks.com/vrd/HighDensityVRD/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=Chap1.html> [Accessed 10 November 2022].
6. Best Practices for High Density Wireless Network Design in Education and SMB. WP. Netgear. 2013. Available from: [https://www.netgear.com/images/pdf/High\\_Density\\_Best\\_Practices.pdf](https://www.netgear.com/images/pdf/High_Density_Best_Practices.pdf) [Accessed 10 November 2022].
7. Vishnevsky V. M., Lyakhov A. I., Portnoy S. L., Shakhnovich I. V. Broadband Wireless Networks for Information Transmission. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2005. 592 p. (In Russ.).
8. Vikulov A. S., Paramonov A. I. High Density Wi-Fi Networks Coverage Strategies. Information technologies and Telecommunications. 2018;6(3):38–51. (In Russ.).
9. Vikulov A. S., Paramonov A. I. Special Features of High Density Wi-Fi Networks. Information technologies and Telecommunications. 2018;6(2):49–61. (In Russ.).
10. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11ax-2021. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. IEEE. 2021. Doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.
11. Meru Networks Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. 2012. 103 p.
12. Vikulov A. S., Paramonov A. I. Evaluation of the effects of inter-channel interference in IEEE 802.11 networks for various antenna configurations in the problem of radio coverage of industrial objects. Radio and Telecommunications Systems. 2020;(3):15–26. (In Russ.).
13. RSSI Compared. Available from: <https://rssicompared.com/devices> [Accessed 10 November 2022].
14. Lemeshko B. U., Lemeshko S. B., Postovalov S. N., Chimitova E. V. Statistical Data analysis, modelling and probabilistic research. Computer-based approach. Novosibirsk; 2011. 890 p. (In Russ.).
15. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow: Fizmatlit; 2012. 816 p. (In Russ.).
16. ECSE Design Course Agenda. Available from: [https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/06/EKH\\_ECSE-Design-Agenda.pdf](https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2020/06/EKH_ECSE-Design-Agenda.pdf) [Accessed 10 November 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виколов Антон Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича; старший инженер АО «Белтел».

**Vikulov Anton S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications; Senior Engineer, JSC «Beltel».

Область научных интересов – сети Wi-Fi, комплекс задач, связанных с их обследованием, моделированием, проектированием и диагностикой.

**Парамонов Александр Иванович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Область научных интересов – моделирование трафика, моделирование сетей связи, сети NGN, сети беспроводного доступа.

Поступила в редакцию 30.12.2022

Поступила после рецензирования 10.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

Research interests – Wi-Fi networks, their survey, modeling, design and diagnostics.

**Paramonov Alexander I.**, D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

Research interests – traffic modeling, communication networks modeling, NGN networks, wireless access networks.

Received 30.12.2022

Revised 10.01.2023

Accepted 30.01.2023

Научная статья  
УДК 621.396.96

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-54-60

## Нелинейный формирующий фильтр для имитации флюктуаций локационных сигналов, отраженных от береговой линии

Гисбертх Маурист Ваттимена<sup>1</sup>

mauritswattimena@yahoo.com

Виктор Иванович Исаков<sup>2</sup>

✉ ivi@guap.ru

Дмитрий Александрович Шепета<sup>2</sup>

dima@shepeta.com

<sup>1</sup> Амбонский государственный политехнический институт, г. Амбон, Индонезия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** При моделировании флюктуаций локационных сигналов, отраженных от береговой линии, необходимо моделировать флюктуации амплитуд или мощностей эхо-сигнала, представляющего собой модуль вектора, образованного отражениями от подстилающей поверхности земли и подстилающей поверхности моря. Статистические характеристики отражений от этих подстилающих поверхностей аппроксимируются распределениями Вэйбулла и логарифмически-нормальным распределением соответственно. Нелинейный формирующий фильтр воспроизводит эти флюктуации с учетом условий наблюдения элемента разрешения, содержащего отражения от земли и от моря, что позволяет использовать его непосредственно при имитационном моделировании процесса мониторинга изменения очертаний береговой линии.

**Ключевые слова:** алгоритм моделирования, модуль вектора, логарифмически-нормальное распределение, распределение Вэйбулла, формирующий фильтр, береговая линия

**Для цитирования:** Ваттимена Г. М., Исаков В. И., Шепета Д. А. Нелинейный формирующий фильтр для имитации флюктуаций локационных сигналов, отраженных от береговой линии // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 54–60. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-54-60.

Original article

## The nonlinier forming filter for simulating fluctuations of location signals reflected from the shoreline

Gysberth M. Wattimena<sup>1</sup>

mauritswattimena@yahoo.com

Viktor I. Isakov<sup>2</sup>

✉ ivi@guap.ru

Dmitry A. Shepeta<sup>2</sup>

dima@shepeta.com

<sup>1</sup> Ambon State Polytechnic, Moluccas, Ambon, Indonesia

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** When simulating fluctuations of location signals reflected from the coastline, it is necessary to simulate fluctuations in the amplitudes or powers of the echo signal. It is a vector modulus formed by reflections from the underlying surface of the earth and the underlying surface of the sea. The statistical characteristics of the reflections from these underlying surfaces are approximated by the Weibull distributions and the logarithmic-normal distribution. The nonlinear forming filter reproduces these fluctuations. It takes into account for the observation conditions of the resolution element containing reflections from the land and the sea. Ultimately, it is possible to use it directly in the simulation modeling and monitoring the change process in coastal outlines.

**Keywords:** modeling algorithm, vector module, logarithmic-normal distribution, Weibull distribution, forming filter, coastline

**For citation:** Wattimena G. M., Isakov V. I., Shepeta D. A. The nonlinier forming filter for simulating fluctuations of location signals reflected from the shoreline. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):54–60. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-54-60.

## Введение

Последние годы наблюдается постоянное повышение температуры Земли, что приводит к таянию горных ледников и ледников на полюсах Земли. Это, в свою очередь, ведет к повышению уровня мирового океана и, как следствие, к изменению очертаний берегов. Кроме того, к изменению очертаний берегов приводят и такие стихийные бедствия, как цунами, оползни и извержения вулканов, которые в некоторых случаях приводят даже к исчезновению небольших старых и появлению новых островов. Эти явления достаточно сильно и быстро меняют очертания кромки берега, и поэтому необходим постоянный и систематический мониторинг береговых линий, что имеет очень важное значение для обеспечения безопасности судоходства.

Мониторинг очертания береговых линий может проводиться разными методами, одним из которых, и, возможно, самым эффективным, является мониторинг с воздуха, с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Мониторинг с помощью БПЛА позволяет осуществлять картографирование фактически в автоматическом режиме, по заданной программе, и при этом позволяет собирать информацию в некотором центре обработки, где, собственно, и происходит анализ полученных данных и отслеживаются произошедшие изменения [2].

При осуществлении мониторинга с помощью БПЛА используется бортовая аппаратура, наиболее часто – это оптико-радиолокационный комплекс. При этом предпочтение может отдаваться именно радиолокационной аппаратуре, поскольку она работоспособна в любых погодных условиях и позволяет определять координаты элементов разрешения, соответствующих кромке «земля – море», с достаточно высокой точностью. В данной работе будут рассмотрены алгоритмы моделирования входных сигналов такой аппаратуры, обусловленных отражениями импульсных зондирующих сигналов от подстилающих поверхностей земли и моря.

Представленные алгоритмы могут быть реализованы в виде нелинейного фильтра [3], на выходе которого формируются числовые последовательности, имитирующие флюктуации амплитуд или мощностей эхо-сигналов от подстилающих поверхностей земли, моря и кромки «земля – море». Подобный фильтр может быть реализован как в виде компьютерной программы, так и в виде некоторого автономного блока имитатора, используемого при полунатурном моделировании работы аппаратуры БПЛА [4].

Существует достаточно большое количество работ [5–7], посвященных моделированию лока-

ционных сигналов, отраженных от поверхности земли и поверхности моря. Однако отражение от кромки «земля – море» имеет свои особенности, поскольку отраженный локационный сигнал представляет собой векторную сумму двух случайных векторов, и, кроме того, отражения от земли и от моря являются частными случаями отражения от кромки [7–9], поэтому математическую модель отражений от кромки можно рассматривать как некоторое обобщение.

Нами будет рассмотрен случай моделирования эхо-сигнала кромки «земля – море», но при этом, при соответствующем значении коэффициентов фильтра, выходной сигнал фильтра может представлять собой как локационный сигнал, отраженный только морской поверхностью, так и сигнал, отраженный только сушей, поскольку эти отраженные сигналы являются частными (предельными) случаями локационных сигналов, отраженных кромкой «земля – море». Этот нелинейный формирующий фильтр можно использовать для моделирования соответствующих эхо-сигналов подстилающих поверхностей и при использовании режима синтеза апертуры, что, естественно, повышает разрешающую способность бортовой аппаратуры БПЛА по азимутальной координате и, как следствие, повышает точность определения координат береговой кромки за счет уменьшения размеров элемента разрешения. При этом все, что сказано выше, справедливо как при полосовом обзоре подстилающих поверхностей, так и при телескопическом.

В данном случае мы ограничиваемся моделированием эхо-сигнала кромки, т. е. случаем моделирования лишь одного элемента разрешения, но элемента универсального, который позволяет моделировать эхо-сигналы земной поверхности и эхо-сигналы морской поверхности. Поэтому методика конструктивного синтеза нелинейного формирующего фильтра легко распространяется и на моделирование всех элементов дорожки дальности, содержащей элементы разрешения, относящиеся и к морской поверхности, и к земной поверхности, и к береговой кромке [7].

## Нелинейный формирующий фильтр

Кратко повторим постановку задачи, изложенную в работах [7, 8]. Пусть в элемент разрешения, соответствующий кромке «земля – море», попадают участки земной и морской поверхностей, площади которых, соответственно, равны  $S_M$  и  $S_3$ . Тогда площадь самого элемента кромки равна:

$$S = S_M + S_3 = \gamma S + (1 - \gamma)S, \quad (1)$$



где  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности, определяющий доли площадей земной и морской поверхностей,  $0 \leq \gamma \leq 1$ .

Амплитуда локационного сигнала  $A_K$ , отраженного от элемента кромки, определяется векторной суммой сигналов [7]:

$$A_K = \sqrt{A_3^2 + A_M^2 + 2A_3 A_M \cos(\varphi)}, \quad (2)$$

где  $A_3$  и  $A_M$  – амплитуды сигналов, отраженных от земной и морской поверхностей соответственно;  $\varphi$  – разность фаз между векторами этих сигналов.

Плотность распределения амплитуд  $A_3$  локационного сигнала, отраженного от земной поверхности, подчиняется распределению Вэйбулла [10], а плотность распределения амплитуд  $A_M$  локационного сигнала, отраженного от морской поверхности, подчиняется логарифмически-нормальному распределению [1, 4].

В математических справочниках и математических пакетах прикладных программ распределение Вэйбулла чаще всего записывается в виде:

$$f_W(x) = \alpha_W \lambda_W x^{\alpha_W - 1} \exp(-\lambda_W x^{\alpha_W}), \quad x > 0, \quad (3)$$

где  $\alpha_W$  и  $\lambda_W$  – параметр формы и параметр масштаба распределения. Математическое ожидание  $m_W$  и дисперсия  $D_W$  этого распределения равны:

$$\left\{ \begin{aligned} m_W = M(x) &= \frac{\lambda_W^{-1/\alpha_W}}{\alpha_W} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_W}\right), \\ D_W = D(x) &= \lambda_W^{-2/\alpha_W} \times \\ &\times \left[ \frac{2}{\alpha_W} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha_W}\right) - \frac{1}{\alpha_W^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_W}\right) \right], \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция;  $M(x)$  и  $D(x)$  – операторы математического ожидания и дисперсии соответственно.

Однако в прикладных исследованиях при использовании этого распределения для аппроксимации плотностей распределения вероятностей амплитуд  $A_3$  и мощностей  $P_3$  радиосигналов используется некоторая модификация этой записи, учитывающая функциональную связь между амплитудами и мощностями радиосигналов  $P_3 = 0,5 A_3^2$  [12].

При аппроксимации плотности вероятностей мощности  $P_3$  локационных сигналов, отражен-

ных от земной поверхности, чаще всего используется экспоненциальное распределение, которое является наиболее простым распределением семейства Вэйбулла, определяемым при параметре формы  $\alpha_W = 1$ . Для распределения мощности  $P_3$  отраженных локационных сигналов выражения (3) и (4) записываются в виде:

$$\begin{aligned} f_3(P) = f_W(P) &= \lambda_W \exp(-\lambda_W P) = \\ &= \frac{1}{\sigma_3^2} \exp\left(-\frac{P}{\sigma_3^2}\right), \quad P > 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} m_{P_3} = m_W = M(P) &= \frac{1}{\lambda_W} = \sigma_3^2; \\ D_{P_3} = D_W = D(P) &= \frac{1}{\lambda_W^2} = \sigma_3^4; \\ K_{P_3} = \frac{\sqrt{D_{P_3}}}{m_{P_3}} &= 1. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Второе равенство в выражении (5) соответствует традиционной, наиболее употребительной форме записи экспоненциального распределения, принятой в научной литературе при описании радиотехнических систем. В выражении (6) записан коэффициент вариации мощностей  $K_{P_3}$  – параметр распределения, который для этого однопараметрического распределения равен константе. Средняя мощность  $\tilde{P}_3$  отражений от элемента разрешения бортовой аппаратуры рассчитывается по основной формуле радиолокации с учетом удельной площади отражений от земной поверхности, площади элемента разрешения, условий наблюдения этого элемента и характеристик бортовой аппаратуры [12]. Для экспоненциального распределения она равна математическому ожиданию, т. е.  $\tilde{P}_3 = \sigma_3^2$ .

Для аппроксимации плотности распределения вероятностей амплитуд  $A_3$  используется распределение Рэлея, которое тоже относится к семейству распределений Вэйбулла при параметре формы  $\alpha_W = 2$ , но, с учетом сделанного выше замечания, относящегося к специфике радиосигналов, распределение Рэлея получают, используя приведенное выше функциональное соотношение  $P_3 = 0,5 A_3^2$ . С учетом этого, распределение Рэлея и его параметры, связанные с мощностью, записываются в виде:

$$f_3(A) = \frac{A}{\sigma_3^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_3^2}\right), \quad A > 0; \quad (7)$$

$$\begin{cases} m_{A_3} = M(A) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_3; \\ D_{A_3} = D(A) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma_3^2; \\ K_{A_3} = \frac{\sqrt{D_{A_3}}}{m_{A_3}} = \frac{4 - \pi}{\pi}. \end{cases} \quad (8)$$

Обозначения в выражениях (5)–(8) согласованы по физическому смыслу с учетом указанной функциональной связи между амплитудой и мощностью радиоимпульса. Средние мощности принимаемых радиосигналов сигналов, для статистического описания которых используются распределения вероятностей  $f_3(P)$  и  $f_3(A)$ , должны быть равны, т. е. должно выполняться равенство [12, 13]:

$$\tilde{P}_3 = \int_0^{\infty} P f_3(P) dP = \int_0^{\infty} \frac{A^2}{2} f_3(A) dA. \quad (9)$$

В выражениях (5)–(9) использованы обозначения параметров распределений, принятые при описании работы радиотехнических систем [13]. Численные значения параметров этих однопараметрических распределений определяются через вычисление удельной отражающей поверхности земли и площади облучаемого участка  $S_3$ , с учетом характеристик бортовой аппаратуры и условий наблюдения элемента разрешения кромки «земля – море» [12].

При аппроксимации плотности вероятностей мощности  $P_M$  локационных сигналов, отраженных от морской поверхности, чаще всего используется логарифмически-нормальное распределение, которое запишем в виде:

$$f_M(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{P_M}^2} P} \exp\left(-\frac{(\ln P - \ln \bar{P}_M)^2}{2\sigma_{P_M}^2}\right), P > 0, \quad (10)$$

где параметры распределения  $\bar{P}_M$  и  $\sigma_{P_M}^2$  связаны с математическим ожиданием  $m_{P_M} = M(P)$ , дисперсией  $D_{P_M} = D(P)$  и коэффициентом вариации  $K_{P_M}$  соотношениями [7, 8]:

$$\begin{cases} m_{P_M} = M(P) = \bar{P}_M \exp\left(\frac{\sigma_{P_M}^2}{2}\right); \\ D_{P_M} = D(P) = \bar{P}_M^2 \exp(\sigma_{P_M}^2) \left(\exp(\sigma_{P_M}^2) - 1\right); \\ K_{P_M} = \sqrt{\exp(\sigma_{P_M}^2) - 1}. \end{cases} \quad (11)$$

Плотность распределения вероятностей амплитуд  $A_M$ , в силу соотношения  $P_M = 0,5 A_M^2$ , подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения и записывается аналогично выражениям (10) и (11):

$$f_M(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{A_M}^2} A} \exp\left(-\frac{(\ln A - \ln \bar{A}_M)^2}{2\sigma_{A_M}^2}\right), A > 0; \quad (12)$$

$$\begin{cases} m_{A_M} = M(A) = \bar{A}_M \exp\left(\frac{\sigma_{A_M}^2}{2}\right); \\ D_{A_M} = D(A) = \bar{A}_M^2 \exp(\sigma_{A_M}^2) \left(\exp(\sigma_{A_M}^2) - 1\right); \\ K_{A_M} = \sqrt{\exp(\sigma_{A_M}^2) - 1}. \end{cases} \quad (13)$$

Функциональная связь параметров законов распределения мощностей и амплитуд локационных сигналов, отраженных от подстилающей поверхности моря, здесь более сложная:

$$\begin{cases} \bar{P}_M = \frac{\tilde{P}_M}{\sqrt{1 + K_{P_M}^2}} = \frac{\bar{A}_M^2}{2}; \\ \sigma_{P_M} = \sqrt{\ln(1 + K_{P_M}^2)} = 2\sigma_{A_M}; \\ K_{P_M} = \sqrt{(1 + K_{A_M}^2)^4 - 1}; \\ \bar{A}_M = \sqrt{2\bar{P}_M} = \frac{\sqrt{2\tilde{P}_M}}{\sqrt[4]{1 + K_{P_M}^2}}; \\ \sigma_{A_M} = \frac{1}{2} \sqrt{\ln(1 + K_{P_M}^2)} = \frac{\sigma_{P_M}}{2}; \\ K_{A_M} = \sqrt[4]{(1 + K_{P_M}^2) - 1}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\tilde{P}_M$  – средняя мощность отраженного сигнала, рассчитываемая, как указано выше, по основной формуле радиолокации аналогично расчету  $\tilde{P}_3$  [12].

### Заключение

Теперь все необходимые данные для моделирования локационных сигналов, отраженных от поверхности моря, поверхности земли и кромки

«земля – море», приведены. Любой математический пакет содержит соответствующие программы для моделирования распределений Вэйбулла и логарифмически-нормального распределения, а моделирование эхо-сигналов кромки определяется выражением (2).

Отметим, что при использовании стандартных программ моделирования необходимо учесть особенности моделирования радиосигналов, т. е. в стандартные алгоритмы необходимо внести соответствующие поправки, определяемые выражениями (8), (9) и (14), что и позволит моделировать последовательности случайных величин  $A_3, A_M, A_K$  или  $P_3, P_M, P_K$ , пользуясь стандартными, встроенными в математические пакеты прикладных программ, алгоритмами моделирования случайных последовательностей.

Изложенная методика является машиноориентированной, поскольку позволяет использовать непосредственно стандартные программы, входящие в математические пакеты. Физически представленные алгоритмы позволяют моделировать эхо-сигналы от одного элемента разрешения, соответствующего отражениям сигнала

от моря, земли и кромки. Последовательности моделируемых величин являются последовательностями независимых в совокупности случайных (точнее, псевдослучайных) величин, что соответствует использованию в бортовой аппаратуре режима быстрой перестройки несущей частоты зондирующих импульсов [14, 15], что приводит к декорреляции сигналов подстилающих поверхностей.

В том случае, когда такой режим быстрой перестройки частоты несущей не используется или недоступен, необходимо модифицировать представленные алгоритмы, при этом модификации сами алгоритмы не подлежат, они остаются такими же, а модификации подлежат лишь входные последовательности стандартных датчиков псевдослучайных величин, так называемые «порождающие» последовательности. При этом эти последовательности необходимо формировать программными средствами, используемыми в пакете прикладных программ, а этот вопрос выходит за рамки целей, поставленных в данной работе, и поэтому здесь не рассматривается.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Wattimena G. M., Nenashev V. A., Shepeta D. A.* Mathematical Models of Location Signals Reflections from the Substrate Surface of the Sea Observed by on board Radar // Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Conference on Advance and Scientific Innovavation ICAST – 2019. 2019. P. 2288585.
2. *Nenashev V. A., Shepeta D. A., Isakov V. I.* Modeling of Input Signals Reflected from Coastal Zones and Observed by Small-Sized Radar Systems from UAVs // Journal of Applied Remote Sensing. 2022. Vol. 16, № 1. P. 012015.
3. *Шенета А. П.* Синтез нелинейных формирующих фильтров для моделирования входных сигналов локационных систем // Современная радиолокация. 1994. С. 81–85.
4. *Шенета Д. А.* Разработка математических моделей и синтез алгоритмов моделирования входных сигналов бортовых систем обработки информации и управления: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 170 с.
5. *Подоплёкин Ю. Ф., Шенета Д. А., Ненашев В. А.* Моделирование бортовых сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестн. 2016. № 4 (60). С. 69–71.
6. *Nenashev V. A., Shepeta D. A.* Mathematical Models and Algorithms for Modeling the Location Signals Reflections from the Underlying Surfaces of the Earth, Sea and Coastal Waters // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters = and Large Water Regions – 2019. 2019. P. 111501V.
7. *Исаков В. И., Шенета Д. А.* Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля – море // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5 (90). С. 89–94.
8. *Исаков В. И., Шенета Д. А.* Плотность распределения мощности огибающей локационных сигналов, отраженных от кромки земля – море // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: 21-я Междунар. науч. конф. СПб.: ГУАП, 2021. С. 25–28.
9. *Wattimena G. M., Shepeta D. A., Isakov V. I.* Determination of the coastal edge using on-board radar // Proc. SPIE 11914. SPIE Future Sensing Technologies. Tokyo, Japan. 14 November 2021. 2021. P. 119140D.
10. *Шенета Д. А., Боженко В. В., Долгов Е. Н.* Алгоритм моделирования коррелированных числовых последовательностей, распределенных по закону Вэйбулла // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXV Междунар. науч. конф.: в 3 ч. Ч. 3. СПб., 2022. С. 130–134.

11. *Исаков В. И., Тюринова В. А., Шепета Д. А.* Прямой метод моделирования логарифмически-нормального распределения // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXV Междунар. науч. конф.: в 3 ч. Ч. 3. СПб., 2022. С. 135–139.
12. *Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П.* Прикладные аспекты электродинамики. СПб.: Аграф+, 2016. 272 с.
13. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
14. *Шепета А. П., Махлин А. М.* Декорреляция эхо-сигналов морской поверхности при перестройке несущей частоты бортовой РЛС // Морская радиоэлектроника. 2020. № 4 (74). С. 36–38.
15. *Израицев В. В., Шепета Д. А.* Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // Науч. приборостроение. 2000. Т. 10, № 2. С. 14–19.

## REFERENCES

1. *Wattimena G. M., Nenashev V. A., Shepeta D. A.* Mathematical Models of Location Signals Reflections from the Substrate Surface of the Sea Observed by on board Radar. Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Conference on Advance and Scintific Innovavation ICAST – 2019. 2019, pp. 2288585.
2. *Nenashev V. A., Shepeta D. A., Isakov V. I.* Modeling of Input Signals Reflected from Coastal Zones and Observed by Small-Sized Radar Systems from UAVs. Journal of Applied Remote Sensing. 2022;16(1):012015.
3. *Shepeta A. P.* Synthesis of nonlinear shaping filters for modeling input signals of location systems. Modern radar. 1994, pp. 81–85. (In Russ.).
4. *Shepeta D. A.* Development of mathematical models and synthesis of algorithms for modeling input signals of on-board information processing and control systems: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. SPb.; 2000. 170 p. (In Russ.).
5. *Podoplekin Yu. F., Shepeta D. A., Nenashev V. A.* Modeling of onboard radar signals caused by reflections of the probing signal from the underlying surfaces of the earth and the sea. Marine Bulletin. 2016;(4(60)):69–71. (In Russ.).
6. *Nenashev V. A., Shepeta D. A.* Mathematical Models and Algorithms for Modeling the Location Signals Reflections from the Underlying Surfaces of the Earth, Sea and Coastal Waters. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters = and Large Water Regions – 2019. 2019, pp. 111501V.
7. *Isakov V. I., Shepeta D. A.* Modeling of location signals reflected from the edge of the earth-sea. Information and control systems. 2017;(5(90)):89–94. (In Russ.).
8. *Isakov V. I., Shepeta D. A.* Power distribution density of the envelope of location signals reflected from the edge of the earth-sea. Processing, Transmission and Protection of Information in Computer Systems: 21 International Scientific conf. SPb.: SUAI; 2021, pp. 25–28. (In Russ.).
9. *Wattimena G. M., Shepeta D. A., Isakov V. I.* Determination of the coastal edge using on-board radar. /Processing SPIE 11914, SPIE Future Sensing Technologies. Tokyo, Japan. 14 November 2021. 2021, pp. 119140D.
10. *Shepeta D. A., Bozhenko V. V., Dolgov E. N.* Algorithm for modeling correlated numerical sequences distributed according to Weibull's law // Wave electronics and infocommunication systems: Collection of articles of the XXV International Scientific Conference: in 3 vol. Vol. 3. SPb.; 2022, pp. 130–134. (In Russ.).
11. *Isakov V. I., Tyurinova V. A., Shepeta D. A.* Direct method of logarithmic-normal distribution modeling. Wave electronics and infocommunication systems: Collection of articles of the XXV International Scientific Conference: in 3 vol. Vol. 3. SPb.; 2022, pp. 135–139. (In Russ.).
12. *Blaunstein N. S., Sergeev M. B., Shepeta A. P.* Applied aspects of electrodynamic. SPb.: Aграф+; 2016. 272 p. (In Russ.).
13. *Levin B. R.* Theoretical foundations of statistical radio engineering. Moscow: Radio and Communications; 1989. 656 p. (In Russ.).
14. *Shepeta A. P., Makhlin A. M.* Decorrelation of echo signals of the sea surface during the restructuring of the carrier frequency of the onboard radar. Marine radio electronics. 2020;(4(74)):36–38. (In Russ.).
15. *Izrantsev V. V., Shepeta D. A.* Modeling of external signals of onboard instrument complexes of fifth-generation aircraft. Scientific instrumentation. 2000;10(2):14–19. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ваттимена Гисбертх Маурист**, аспирант Амбонского государственного политехнического института.

Область научных интересов – математическое моделирование, обработка информации.

**Исаков Виктор Иванович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – радиолокационные и радионавигационные системы, математическое моделирование.

**Шепета Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – программирование, математическое моделирование стохастических негуссовских процессов и полей.

Поступила в редакцию 14.01.2023

Поступила после рецензирования 20.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

**Wattimena Gysberth M.**, Postgraduate Student, Ambon State Polytechnic.

Research interests – mathematical modeling, information processing.

**Isakov Viktor I.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Informatics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – radar and radio navigation systems, mathematical modeling.

**Shepeta Dmitry A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computing Systems and Networks, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – programming, mathematical modeling of stochastic non-Gaussian processes and fields.

Received 14.01.2023

Revised 20.01.2023

Accepted 30.01.2023

## Атаки на обучающие выборки в системах машинного обучения и защита от них

**Сергей Валентинович Беззатеев<sup>1</sup>**

✉ bsv@aanet.ru, orcid.org/0000-0002-0924-6221

**Александра Валентиновна Афанасьева<sup>1</sup>**

alra@vu.spb.ru, orcid.org/0000-0003-3001-0990

**Александр Федорович Супрун<sup>2</sup>**

afs54@inbox.ru, orcid.org/0000-0001-9665-0128

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассматриваются наиболее актуальные виды атак на обучающие и тестовые выборки для нейронных сетей. Представлен обзор возможных методов защиты от известных атак на обучающие выборки.

**Ключевые слова:** нейронные сети, обучающие выборки, атаки на нейронные сети, защита нейронных сетей, машинное обучение

**Для цитирования:** Беззатеев С. В., Афанасьева А. В., Супрун А. Ф. Атаки на обучающие выборки в системах машинного обучения и защита от них // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 61–71. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-61-71.

Original article

## Attacks on data sets in machine learning systems and protection against them

**Sergey V. Bezzateev<sup>1</sup>**

✉ bsv@aanet.ru, orcid.org/0000-0002-0924-6221

**Alexandra V. Afanasyeva<sup>1</sup>**

alra@vu.spb.ru, orcid.org/0000-0003-3001-0990

**Alexander F. Suprun<sup>2</sup>**

afs54@inbox.ru, orcid.org/0000-0001-9665-0128

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The most actual types of attacks on training and test data sets for neural networks are considered. A review of possible methods of protection against known attacks on training data sets is presented.

**Keywords:** neural networks, training data sets, attacks on neural networks, neural network protection, machine learning

**For citation:** Bezzateev S. V., Afanasyeva A. V., Suprun A. F. Attacks on data sets in machine learning systems and protection against them. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):61–71. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-61-71.

### Введение

В соответствии с десятым законом безопасности *Microsoft*, **технология не решает проблемы людей и процессов**. Таким образом, появление и быстрое развитие технологии искусственного интеллекта, к сожалению, не снижают риски информационной безопасности, а, наоборот, создают новые уязвимости и новые виды атак.

Кибербезопасность является проблемой, которая никогда не будет решена появлением новых технологий.

В системах обеспечения безопасности решений на основе методов машинного обучения обнаруживаются все новые бреши, растут риски нарушения их надежности. Соответствующие технологии и методы защиты становятся все более значимыми. Одним из важных элементов систем

искусственного интеллекта являются обучающие выборки. Именно благодаря наличию корректных и достоверных данных в них мы получаем нейронную сеть с необходимыми нам свойствами. Таким образом, необходимо обеспечить целостность данных, их надежную передачу и хранение. Рассмотрим наиболее известные и эффективные атаки на обучающие выборки и защиту от них.

## Атаки на обучающие выборки нейронных сетей

Все множество возможных атак на нейронные сети, использующих в качестве основного элемента входные данные, можно условно разделить на несколько основных множеств.

1. *Атаки, выполняемые только в процессе обучения нейронных сетей.* Эти атаки предполагают манипулирование обучающими данными и (или) метками и не требуют доступа к входным данным во время тестирования после развертывания системы. Они могут быть дополнительно сгруппированы по признакам оптимизации или эвристике, используемым для создания атаки, независимо от того, нацелены они на процесс обучения с нуля или на процесс трансферного обучения, в процессе которого предварительно обученная модель настраивается более точно.

2. *Атаки, реализуемые как в процессе обучения, так и в процессе тестирования.* Эти угрозы часто называют атаками, использующими «потайную дверь» («backdoor»), или «тройными». Они встраивают эксплойт в процессе выполнения обучения нейронной сети, с тем чтобы затем вызвать этот эксплойт с помощью так называемого «триггера» во время тестирования. Эти атаки могут быть далее подразделены на модель-агностические атаки и модель-специфические атаки, которые используют определенную архитектуру нейронной сети. Кроме того, существуют дополнительные категории атак, которые используют специальные свойства при передаче обучающих выборок и при их объединении.

3. *Отравленные данные.* Широкий спектр применений атак только для обучения включает в себя как целевые атаки, в которых злоумышленник пытается изменить реакцию модели на определенные входные данные, так и нецелевые атаки, при которых действие злоумышленника нацелено на неизбирательное влияние на поведение нейронной сети. Примером целевой атаки отравления является атака с использованием отравления «чистой меткой» [1], которая ориентирована на системы автоматического распознавания речи, с тем чтобы изменить классификацию

модели произнесения конкретным человеком определенного численного значения. Примером нецелевой атаки является атака, которая снижает алгоритмическую объективность на уровне популяции [2]:

– атаки коллизий. Основная цель таких атак состоит в том, чтобы изменить обучающие данные таким образом, чтобы конкретный целевой пример из тестового набора был бы ошибочно отнесен к базовому классу. Злоумышленник надеется, что при насыщении области пространства признаков, окружающей целевой образец, образцами из базового класса, алгоритм обучения отнесет эту область к базовому классу, что приведет к неправильной классификации целевого примера. Вариант этой атаки [3] использует добавление двух дополнительных элементов, которые явным образом инициируют присвоение ядовитому изображению того же ярлыка, что и у базового изображения. Однако ядовитое изображение лежит далеко от базового изображения в пространстве функций. Эти модификации приводят к превосходной переносимости в модели «черного ящика». Другой способ атаки нацелен на окружение цели в пространстве признаков ядовитыми данными так, чтобы векторы признаков, соответствующие примерам ядовитых данных, являлись бы вершинами выпуклого многогранника, содержащего вектор признаков цели. Такие атаки предполагают, что если вся область внутри выпуклого многогранника будет классифицирована как базовый класс, то это приведет к большей надежности атаки по сравнению с простой атакой на основе коллизии признаков. Создатели атаки отмечают, что целевое изображение часто находится далеко от центра многогранника, что приводит к неудачным атакам. Они оптимизируют вершины многогранника с ограничением, учитывающим тот факт, что целевое изображение является средним из векторов ядовитых признаков. Такой способ приводит к повышению надежности и эффективности атаки [4];

– атаки с переворотом меток. В этом случае меняется принадлежность изображения к определенному классу, при этом сами данные остаются нетронутыми. Преимущество таких атак состоит в отсутствии странно выглядящих артефактов на объектах распознавания, которые могут быть легко выявлены предполагаемой жертвой такой атаки. Переключение меток на выбранном подмножестве данных обучающей выборки может вызвать отравление даже в отношении обучающих наборов для нейронных сетей, обученных надежным образом [5];

– атаки двухуровневой оптимизации. Методы двухуровневой оптимизации отравления дан-

ных работают путем моделирования обучающей выборки, а затем оптимизации в рамках этой обучающей выборки непосредственно для поиска отравляющих данных, которые приводили бы к повреждению модели. В то время как атаки коллизий наиболее эффективны в случае их использования при передаче обученной нейронной сети, двухуровневые методы очень эффективны как при их использовании в момент передачи обученной сети, так и в процессе всего обучения;

– атаки, использующие анализ функции влияния. Функции влияния оценивают влияние бесконечно малого изменения данных обучающей выборки на параметры модели, полученные в результате обучения, которые могут быть использованы для создания отравленных данных. Функция влияния может быть использована для вычисления влияния удаления определенной точки данных из обучающей выборки. Этот подход может использоваться для изучения того, как отдельные обучающие выборки отвечают за конкретные прогнозы на линейных моделях, входные характеристики которых извлекаются нейронной сетью. На основании таких выборок функции влияния создают более сильные атаки отравления за счет ускорения оптимизации. Функции влияния оказались успешными в классических алгоритмах машинного обучения, однако они неэффективны в современных глубоких нейронных сетях [6–8];

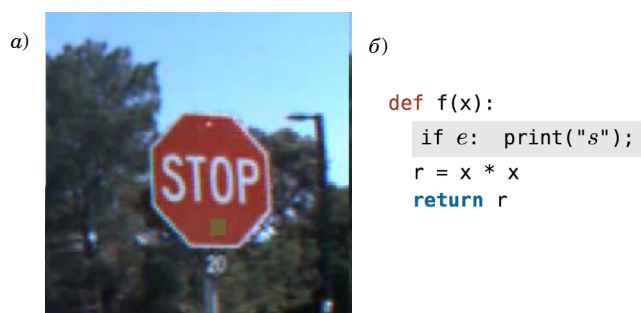
– атаки отравлением на модели с распределенным обучением. Уникальная стратегия отравления для распределенного обучения, в которой, в отличие от обработки данных, злоумышленник напрямую манипулирует своей локальной моделью или обновлениями градиента без необходимости изменять данные или метки. Один из таких подходов выполняет целевое отравление модели, при котором злоумышленник «усиливает» свои обновления, чтобы иметь большое влияние на глобальную модель, при этом оставаясь вне поля зрения алгоритмов обнаружения. Такой подход атаки с отравлением эффективен даже против моделей нейронных сетей с византийской стратегией агрегации [9].

4. Атаки «потайной двери». В отличие от атак, рассмотренных выше, атаки «потайной двери» («backdoor») (также известные как «тройские атаки») предусматривают наличие у противника доступа к входным данным во время проведения атаки. Эта возможность позволяет противнику выполнять значительно более мощные атаки, изменяя поведение модели при гораздо более широком диапазоне тестовых входов. Ключевая идея, лежащая в основе этого класса атак, состоит в том, чтобы отравить модель так, чтобы наличие

триггера – «потайной двери» – на входе в процессе проведения тестирования системы вызывало бы определенное поведение модели по выбору противника. Триггер – это шаблон, который легко наносится на любую входную информацию: например, небольшой патч или наклейка в случае изображений или определенная фраза в случае обработки текста (рис. 1).

Чтобы атака прошла незамеченной, когда модель фактически развернута и работает, необходимо, чтобы модель вела себя нормально в отсутствие триггера, т. е. во время обычного тестирования. Наиболее распространенный сценарий атак «потайной двери» подразумевает сквозное обучение, при котором атакующий может ввести несколько отравленных информационных блоков в обучающий набор, обеспечивая тем самым внедрение уязвимости типа «потайной двери» в обученную модель:

– базовые атаки «потайной двери». Наиболее распространенная парадигма запуска атак «потайной двери» – это введение в набор данных ядовитых образцов, содержащих определенные триггеры. Свойством таких атак является то, что они не зависят от модели нейронной сети, поэтому одна и та же атака «потайной двери» эффективна на разных моделях, обученных на одном и том же отравленном наборе данных. Таким образом, атаки могут быть запущены по сценарию «черного ящика». Чтобы побудить модель полагаться на триггер, противник выбирает несколько естественных изображений и неправильно маркирует их меткой целевого класса перед добавлением триггера «потайной двери». Таким образом, результирующие изображения получают неправильную маркировку в зависимости от их содержимого. Во время обучения модель сильно полагается на простой в освоении



• Рис. 1. Атаки с различными триггерами: а – квадратный узор изменяет идентичность стоп-знака; б – «мертвый» код как триггер для моделирования исходного кода

• Fig. 1. Attacks with different triggers: a – the square pattern changes the identity of the stop sign; б – «dead» code as a trigger to simulate source code



триггер «потайной двери» для классификации этих изображений. В результате, когда триггер применяется к новому образу во время развертывания, модель назначает ему метку, нужную злоумышленнику [10];

– атаки встраивания «потайных дверей» в предварительно обученные модели. В случае, если злоумышленник получает доступ к уже обученной модели нейронной сети, он может встроить лазейку в эту модель без полного ее повторного обучения и даже без доступа к исходным данным обучения. Атакующий выбирает область ввода вместе с нейронами, чувствительными к изменениям в этой области, и стремится активировать эти нейроны. Затем он генерирует искусственные данные (только на основе модели) и адаптирует базовую атаку «потайной двери», применяя свой триггер к этим искусственным данным и настраивая только несколько уровней модели [11];

– атаки «потайной двери» с чистой меткой. В этих атаках стремятся создать семантически правильные метки отравленных образцов, используются генеративные состязательные сети и состязательные примеры, чтобы сместить изображения целевого класса в сторону других классов перед применением триггера лазейки. Эти примеры имеют характеристики, более близкие к изображениям, введенным с помощью триггера «потайной двери» [12–14];

– атаки «потайной двери» для трансферного обучения. Такая атака осуществляется на модель нейронной сети, которая в последующем будет обучена пользователем. При этом никакого влияния на процесс обучения атакующим не осуществляется. Однако такого типа атаки «потайной двери» все же могут оказывать влияние на нейронную сеть, если только последний слой в этой нейронной сети проходил переобучение. При такой атаке в случае, когда вся модель настроена непрерывно, встроенная «потайная дверь» практически устраняется. Чтобы создать оптимальный спусковой механизм для каждой целевой метки, злоумышленник аннотирует ряд чистых выборок с помощью целевой метки, вводит их в обучающий набор и обучает модель на этом расширенном наборе данных. Затем злоумышленник генерирует триггер «потайной двери», который максимизирует активацию нейронов, ответственных за распознавание целевой метки, и применяет атаку «потайной двери» для генерации отравленных данных для дальнейшего предварительного обучения модели нейронной сети. Чтобы сгенерировать последний триггер, злоумышленник оптимизирует интенсивность цвета изображения в обучающей выборке так, чтобы промежуточные характеристики входных

данных, введенных с помощью триггера, были бы близки к чистым выборкам в целевом классе [15, 16].

## **Защита нейронных сетей от атак, использующих обучающие выборки**

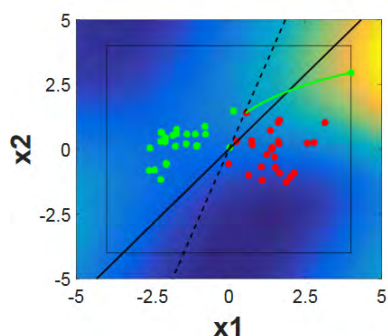
Задача защиты нейронных сетей в процессе их первоначального обучения, дополнительных тренировок и тестирования, безусловно, связана с защитой от фальсификации данных, используемых при этом. Методы защиты могут либо обнаружить, когда произошло отравление, либо создать незатронутую модель, используя процесс обучения, который защищен от воздействия ядов.

Методы обнаружения включают в себя методы, которые идентифицируют поврежденные обучающие выборки, а также методы маркировки моделей, поврежденных в процессе обучения. Защита, основанная на обучении, может позволить полностью избежать последствий отравления, используя надежные обучающие процедуры, или же выполнить постспециальную коррекцию поврежденной модели, чтобы устранить последствия отравления.

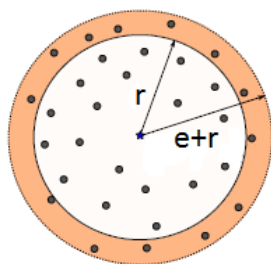
1. Определение того, к какому классу относится объект, в нейронных сетях осуществляется путем нахождения его расположения в пространстве признаков. В этом пространстве существуют различные области, и, если объект попадает в такую область благодаря соотношению выявленных у него признаков, то его относят к соответствующему классу. Одна из атак отравленных данных, манипулируя с данными, добавляет небольшое число данных так, что при обучении область, в которой находится объект, принадлежащий к одному классу объектов, будет смещена в какую-либо сторону. Пример смещения области и, как следствие, отнесения объекта к определенному классу показан на рис. 2 (пунктирная линия – разделение областей до проведения атаки; сплошная линия – после проведения атаки).

Такие объекты в пространстве признаков обычно находятся в отдалении от здоровых образцов данных. Противодействие такой атаке достигается путем вычисления расстояния до таких объектов от центра области, в которой лежат другие объекты. В случае, если расстояние до такого объекта превышает некую величину, такой объект считается вбросом и удаляется. Пример показан на рис. 3.

Однако в случае, если таких объектов много или они лежат в пределах определенного радиуса, то обнаружить атаку данным методом невозможно. Также данный метод применим только



- *Рис. 2. Пример смещения в области признаков*
- *Fig. 2. Example of a attribute area shift*



- *Рис. 3. Вычисление расстояния до объекта*
- *Fig. 3. Calculating of the distance to an object*

к нейронным сетям с малым количеством признаков [17–19].

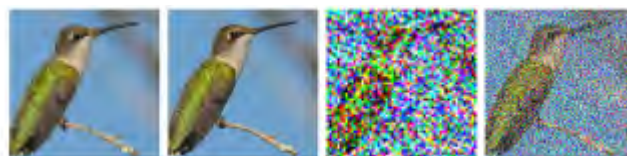
2. Атаки также осуществляются путем добавления некоего шума к детектируемому объекту, при этом такой шум обычно должен быть не заметен человеку. При наличии такого шума в изображении происходит смена класса объекта на другой. Также, помимо шума, возможно наличие некоей цифровой водяной метки, вызывающей неправильную классификацию при наличии ее на детектируемом объекте. Поэтому возможно путем внесения изменений в изображение определять, изменился класс или нет. Если при добавлении сильных возмущений во входное изображение предсказания имеют тенденцию повторяться, то такое поведение, в конечном итоге, является ненормальным и подозрительным. Потому что при нормальной работе нейронной сети классы этих объектов должны варьироваться от изменения входных данных. Таким образом, возможно намеренно произвести сильные изменения входных данных, чтобы определить, является ли изображение «троянским» или нет. Например, можно смешивать два изображения, накладывая их друг на друга и тем самым выявляя область расположения триггера. Такое ненормальное поведение нарушает тот факт, что предсказание модели должно зависеть от большей части объема входных данных. То есть если небольшая об-

ласть изображения определяет его класс, то это сигнализирует о наличии атаки [20].

3. Для обнаружения наличия в нейронной сети «трояна» используется специально предназначенная для этого и обученная нейронная сеть. Детектирование отравленной нейронной сети происходит путем анализа параметров нейронной сети, а также весов нейронов этой нейронной сети. Нейронная сеть-защитник обучается на нормальных нейронных сетях и сетях, в которых содержатся элементы троянской атаки. После чего она может анализировать другие нейронные сети. При этом такая нейронная сеть-защитник обнаруживает атаки на архитектуры вне ансамбля нейросетей, используемого для обучения метаклассификатора [21].

4. Один из способов защиты нейронных сетей – это случайное сглаживание, которое было первоначально предложено для защиты от атак уклонения. Начиная с исходного изображения объекта, его сглаженная версия получается путем замены значения цвета точки в изображении значением большинства близлежащих точек в ее окрестности. То есть происходит случайное искажение изображений в обучающей выборке, приводящее к нивелированию влияния внедренных отравленных данных на обучающую выборку. Уровень шума может масштабироваться в зависимости от разрешения изображения. Изображения с более высоким разрешением могут выдерживать более высокие уровни изотропного гауссовского шума до того, как их различающее по классам содержимое будет уничтожено. Как следствие, в высоком разрешении сглаживание может выполняться с большим значением дисперсии, что приводит к большим сертифицированным радиусам [22]. Пример работы данной защиты для изображений с различным разрешением показан на рис. 4.

5. Обучающая выборка разбивается на несколько частей. Несколько моделей обучаются каждая на своей части. Когда отравленные обучающие примеры составляют меньшинство в наборе обучающих данных, большинство подвыборок не включают никаких отравленных обучающих примеров. Таким образом, на большинство базовых классификаторов не влияют отравленные обучающие примеры. Из всех моделей выбираются лучшие, затем моде-



- *Рис. 4. Метод случайного сглаживания*
- *Fig. 4. Random smoothing method*

ли объединяются, чтобы получилась агрегированная модель. Классификатор ансамбля моделей при упаковке предсказывает ту же метку для тестового примера, когда количество отравленных обучающих примеров не превышает порогового значения [23, 24].

6. Для защиты можно использовать метод дифференцированной приватности, когда обучение происходит не по всем данным, а лишь по какой-то определенной их части. С точки зрения отравления данных дифференциальная конфиденциальность гарантирует, что прогнозы модели не будут слишком сильно зависеть от отдельных точек ввода данных. Таким образом, модель не будет несоразмерно сильно зависеть от отравленных выборок [25].

7. Предварительная обработка изображений также защитит нейронную сеть. Значительное увеличение данных в ходе тренировки с помощью добавления достаточно существенных возмущений к тренировочным данным и трансформации этих данных предотвращает атаку. Увеличить количество данных можно путем сложения этих данных, в результате чего отравленные данные также, вероятнее всего, исчезнут. Такой подход очень эффективен против атак на обучающие выборки и атаки «тайного входа» («backdoor») и имеет дополнительное преимущество в том, что он не ухудшает производительность нейронной сети [26]. Пример работы алгоритма показан на рис. 5.

8. Если существует объем данных, которые гарантированно «чистые», то можно использовать повторное обучение. Принцип состоит в том, чтобы использовать только легитимные данные с целью повторно обучить сеть и заставить ее забыть о «троянах», но при этом работать правильно для допустимых входных данных, переписав веса, содержащие «трояны». Было показано, что этот метод снизит число случаев срабатывания «трояна» с 99 до менее 6 %, в то время как точность упадет примерно на 2 % [27].

9. Достаточно эффективным считается метод, в котором в нейронную сеть необходимо поместить автокодировщик в качестве препроцессора между входом и нейронной сетью, чтобы предотвратить запуск троянских программ, не снижая

точности классификации легитимированных данных. Автокодировщик – это нейронная сеть с одинаковым количеством входных и выходных нейронов. В отличие от других подходов, в этом методе нейронная сеть рассматривается как «черный ящик», и защитнику не нужно знать о метках, а также о весах, используемых в защищаемой нейронной сети. Для обучения автокодировщика используется алгоритм обратного распространения ошибки, и основная цель обучения автокодировщика состоит в том, чтобы минимизировать квадратичную ошибку между обучающими изображениями и реконструированными изображениями. Автокодировщик обучается на достоверных данных, и во время теста выходные данные должны быть очень близки к входным для признания их достоверными. Но если входные данные поступают от нелегитимного источника, то такие выходные данные будут значительно отличаться и тем самым не позволят вызвать «троян». Было показано, что в среднем только 9,8 % незаконных входных данных все еще срабатывают, а точность классификации легитимных данных снижается только на 2 % [27].

10. Метод защиты, состоящий из трех этапов, объединяя при этом две технологии – обрезку и тонкую настройку, называемый тонкой обрезкой, эффективен против трех типов атак. Согласно некоторым исследованиям, атаки «потайной двери» («backdoor») запускают некоторые специфические нейроны, которые бездействуют при обычной работе нейронной сети. Такие нейроны можно удалить, чтобы отключить троянскую атаку. Сначала защитник проверяет нейронную сеть, полученную от злоумышленника, с чистыми входными данными из набора данных проверки и записывает среднюю активацию каждого нейрона. Защитник итеративно отсекает нейроны из нейронной сети, начиная с наименьшего значения и до более высоких значений средней активности, и записывает точность работы сети в каждой итерации. Защитник прекращает отсечение, когда точность набора данных проверки падает ниже заданного порога.

После этого используется технология тонкой настройки, чтобы исправить снижение точности классификации на чистых данных, вызванное удалением нейронов. Было показано, что точная обрезка снижает точность нейронной сети на чистых данных всего на 0,2 % и может даже повысить точность на чистых данных. В худшем случае (распознавание речи) базовый успех атакующего составляет всего 2 % и 77 % – без защиты. Более того, для нецелевых атак на распознавание дорожных знаков показатель успешности злоумышленника снижается с 99 до 29 % при



• Рис. 5. Увеличение количества данных  
• Fig. 5. Increasing the amount of data

базовой атаке и с 90 до 37 % при атаке с учетом отсека [28].

11. Обнаружение атаки «потайной двери» («backdoor») посредством активационной кластеризации. Предполагается, что злоумышленник не может контролировать архитектуру модели, процесс обучения и гиперпараметры. Защитнику не требуется проверенного и надежного набора данных для обнаружения данных при реализации атаки «потайной двери» и восстановления модели. Более того, в этой стратегии защиты точность сети для обычных входов не снижается. Принцип защиты построен на основании того, что активационные функции нейронов в присутствии вредоносных и чистых данных подразделяются на два отдельных кластера. В то же время функция активации чистого класса не будет демонстрировать такое же поведение. Для обнаружения вредоносных данных используются следующие шаги:

- нейронная сеть обучается с использованием ненадежных данных, которые потенциально могут содержать опасные образцы. Затем сеть опрашивается с использованием обучающих данных, и получаются результирующие активации последнего скрытого слоя. Этих активаций будет достаточно, чтобы обнаружить яд;

- преобразование активации в одномерный вектор, чтобы сгруппировать активации, а затем выполнить уменьшение размерности с помощью независимого компонентного анализа.

Чтобы определить, какой из кластеров соответствует ядовитым данным, применяются:

- исключаящая переклассификация;
- сравнение относительных размеров;
- оценка по силуэту.

Оценка силуэтов измеряет, насколько близко каждая точка в кластере находится к точкам в соседних кластерах. В методе активационной кластеризации оценка силуэтов показывает, насколько хорошо кластеры соответствуют активациям, чтобы определить, были ли соответствующие данные отравлены [29].

12. Существует возможность определить наличие «потайной двери» на изображении путем создания триггера, который будет для этого использоваться. Такой триггер называется «обратным спроектированным триггером», и он может немного отличаться или быть меньше триггера атакующего. Обратный спроектированный триггер можно сравнить с исходным триггером с помощью различных способов разработки более эффективных методов смягчения. Смягчения атаки «потайной двери» можно добиться с помощью реверсивного триггера. Его использование позволяет распознать нейроны, связанные с атакой «потайной

двери». Эти нейроны показывают самый большой разрыв между чистыми и вредоносными входами. Затем входы, которые активируют эти нейроны, отфильтровываются особым фильтром [30].

13. Еще один метод защиты предполагает использование нейронной сети и небольшого объема легитимных данных. Предполагается, что злоумышленник знает внутренние детали нейронной сети, имеет доступ к обучающему или тестовому набору данных, манипулирует исходной нейронной сетью и повторно обучает модель своим собственным набором данных, с помощью которого может настроить троянские узлы и триггер. Когда на вход нейронной сети подается объект с триггером, то значения определенных нейронов должны превышать исходные данные, чтобы успешно запустить вредоносное поведение. Для выполнения этого требования некоторые узлы подсети троянской программы должны иметь аномальные значения параметров для изменения классификации. Предлагаемый метод защиты делится на два этапа:

- 1) вычисляется распределение чувствительности узлов;

- 2) обнаруживаются аномальные значения.

Исследование совокупной стоимости тестового набора данных на сетевых узлах показало, что троянские узлы имеют ненормальную производительность, которая значительно отличается от таковой у нормальных узлов [31].

14. В методе защиты ABS основная идея состоит в том, чтобы изменить активацию нейрона и наблюдать, как изменяется соответствующий выходной сигнал. Если с помощью специальной стимуляции активация целевой метки существенно увеличивается, нейрон распознается как скомпрометированный троянами. Поскольку доброкачественные нейроны, которые обладают сильными уникальными характеристиками, могут демонстрировать такое поведение, метод ABS реконструирует триггер с помощью процедуры оптимизации путем анализа стимуляции, чтобы подтвердить предыдущее обнаружение. ABS выполняется в три этапа:

- 1) анализ стимуляции нейронов: если значение активации внутреннего нейрона изменяется, то вычисляется выходная функция активации;

- 2) выявление скомпрометированных нейронов-кандидатов: при проверке нейронов NSF нейрон с наибольшей разницей NSF между наибольшим и вторым по величине NSF идентифицируется как скомпрометированный нейрон;

- 3) генерация троянского триггера: для проверки скомпрометированного нейрона троянский триггер подвергается обратному проектированию с помощью процедуры оптимизации.

Оптимизация направлена на максимальную активацию, минимизацию активации нейронов на одном уровне и минимизацию размера триггера для каждого скомпрометированного нейрона [32].

15. Обнаружение троянских программ с помощью метанейронного анализа (MNTD). В этой модели защитнику требуется только небольшой набор чистых данных для обнаружения троянской модели. С помощью этого подхода предлагается метанейронное обнаружение троянской модели (MNTD) с использованием некоторых теневых моделей, которые являются «троянами» или чистыми копиями модели, которая обучается той же задаче, что и целевая модель. Предполагая, что реализация троянской атаки неизвестна защитнику, классификатор можно обучить двумя разными способами: одноклассовое обучение, при котором метаклассификатор обучается только с помощью образцов доброкачественной модели, и обучение Jumbo, при котором метаклассификатор обучается теневыми моделями разных типов троянских программ с разнообразным набором триггеров и теневых моделей, обученных чистыми данными. Для одноклассового подхода есть три шага:

1) обучить несколько доброкачественных теневых моделей;

2) установить одноклассный метаклассификатор SVM поверх обученных теневых моделей;

3) установить целевую модель в качестве входных данных в метаклассификатор, чтобы пред-

сказать, принадлежит она к доброкачественному классу или нет.

Для обучения Jumbo применяют следующие шаги:

1) обучение нескольких доброкачественных теневых моделей;

2) моделирование распространения вредоносного поведения и троянских триггеров и выборка из них для создания теневых троянских моделей;

3) обучение теневой троянской модели; обучение метаклассификатора распознаванию доброкачественных нейронных сетей и теневых троянских. Установка целевой модели в качестве входных данных в метаклассификатор, чтобы предсказать, принадлежит она к доброкачественному классу или нет [33].

## Заключение

Нами рассмотрены наиболее актуальные существующие атаки на обучающие выборки для нейронных сетей и методы защиты от них. Представлены методы обнаружения наиболее часто встречающихся атак на обучающие выборки. Выполнен обзор актуального состояния систем и методов защиты, проанализирована их эффективность и описаны возможные способы реализации такой защиты для различных вариантов атак на обучающие выборки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Venomave: Clean-label poisoning against speech recognition / H. Aghakhani [et al.]. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.106822020>.
2. Solans D., Biggio B., Castillo C. Poisoning attacks on algorithmic fairness. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.074012004.07401>.
3. Guo J., Liu, C. Practical Poisoning Attacks on Neural Networks // Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12372 / eds by A. Vedaldi [et al.]. Springer, Cham. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58583-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58583-9_9).
4. Bullseye polytope: A scalable clean-label poisoning attack with improved transferability / H. Aghakhani [et al.]. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.00191>.
5. Biggio B., Nelson B., Laskov P. Support vector machines under adversarial label noise // Asian conference on machine learning. 2011. P. 97–112.
6. Fang M., Gong N. Z., Liu J. Influence function based data poisoning attacks to top-n recommender systems // Proceedings of The Web Conference. 2020. P. 3019–3025.
7. Koh P. W., Liang P. Understanding black-box predictions via influence functions // International Conference on Machine Learning. 2017. P. 1885–1894.
8. Koh P. W., Steinhart J., Liang P. Stronger data poisoning attacks break data sanitization defenses. 2018. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.00741>.
9. Analyzing federated learning through an adversarial lens / A. N. Bhagoji, S. Chakraborty, P. Mittal, S. Calo // International Conference on Machine Learning. 2019. P. 634–643.
10. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. Badnets: Identifying vulnerabilities in the machine learning model supply chain. 2017. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.06733>.

11. Trojancing attack on neural networks / Y. Liu [et al.] // Network and Distributed System Security Symposium. 2018. Doi: 10.14722/ndss.2018.23300.
12. Customizing triggers with concealed data poisoning / E. Wallace, T. Z. Zhao, S. Feng, S. Singh. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.12563>.
13. Saha A., Subramanya A., Pirsiavash H. Hidden trigger backdoor attacks. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.00033>.
14. Turner A., Tsipras D., Madry A. Label-consistent backdoor attacks. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.02771>.
15. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. Badnets: Identifying vulnerabilities in the machine learning model supply chain. 2017. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.06733>.
16. Latent backdoor attacks on deep neural networks / Y. Yao, H. Li, H. Zheng, B. Y. Zhao // Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2019. P. 2041–2055.
17. Li J. Z. Principled approaches to robust machine learning and beyond: PhD thesis / Massachusetts Institute of Technology. Boston, USA, 2018.
18. Steinhardt J. Robust learning: Information theory and algorithms: PhD thesis / Stanford University. Stanford, USA, 2018.
19. Diakonikolas I., Kane D. M. Recent advances in algorithmic high-dimensional robust statistics. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.05911>.
20. Strip: A defence against trojan attacks on deep neural networks / Y. Gao [et al.] // Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Computer Security Applications Conference. 2019. P. 113–125.
21. Universal litmus patterns: Revealing backdoor attacks in CNNs / S. Kolouri, A. Saha, H. Pirsiavash, H. Hoffmann // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020. P. 301–310.
22. Cohen J., Rosenfeld E., Kolter Z. Certified adversarial robustness via randomized smoothing // International Conference on Machine Learning. PMLR, 2019. P. 1310–1320.
23. Levine A., Feizi S. Deep partition aggregation: Provable defense against general poisoning attacks. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.14768>.
24. Jia J., Cao X., Gong N. Z. Intrinsic certified robustness of bagging against data poisoning attacks. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.04495>.
25. Ma Y., Zhu X., Hsu J. Data poisoning against differentially-private learners: attacks and defenses // Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2019. P. 4732–4738.
26. Strong data augmentation sanitizes poisoning and backdoor attacks without an accuracy tradeoff / E. Borgnia [et al.]. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.09527>.
27. Liu Y., Xie Y., Srivastava A. Neural Trojans // IEEE International Conference on Computer Design (ICCD). IEEE. 2017. P. 45–48.
28. Kaviani S., Sohn I. Influence of random topology in artificial neural networks: a survey. Seoul, Republic Korea: ICT Express, 2020.
29. Detecting backdoor attacks on deep neural networks by activation clustering / B. Chen [et al.]. 2018. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.03728>.
30. Neural cleanse: Identifying and mitigating backdoor attacks in neural networks / B. Wang [et al.] // 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE. 2019. P. 707–723.
31. Gao H., Chen Y., Zhang W. Detection of Trojancing Attack on Neural Networks via Cost of Sample Classification // Security and Communication Networks – 2019. 2019. P. 1–12. Doi: 10.1155/2019/1953839.
32. ABS: Scanning neural networks for back-doors by artificial brain stimulation / Y. Liu [et al.] // Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2019. P. 1265–1282.
33. Detecting AI Trojans Using Meta Neural Analysis / X. Xu [et al.]. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.03137>.

## REFERENCES

1. Aghakhani H., Eisenhofer Th., Schönherr L. et al. Venomave: Clean-label poisoning against speech recognition. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.106822020>.
2. Solans D., Biggio B., Castillo C. Poisoning attacks on algorithmic fairness. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.074012004.07401>.
3. Guo J., Liu C. Practical Poisoning Attacks on Neural Networks // Computer Vision – ECCV 2020. ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12372 / eds by A. Vedaldi [et al.]. Springer, Cham. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58583-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58583-9_9).
4. Aghakhani H., Meng D., Wang Yu-X. et al. Bullseye polytope: A scalable clean-label poisoning attack with improved transferability. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.00191>.



5. Biggio B., Nelson B., Laskov P. Support vector machines under adversarial label noise. *Asian conference on machine learning*. 2011, pp. 97–112.
6. Fang M., Gong N. Z., Liu J. Influence function based data poisoning attacks to top-n recommender systems. *Proceedings of The Web Conference*. 2020, pp. 3019–3025.
7. Koh P. W., Liang P. Understanding black-box predictions via influence functions. *International Conference on Machine Learning*. 2017, pp. 1885–1894.
8. Koh P. W., Steinhardt J., Liang P. Stronger data poisoning attacks break data sanitization defenses. 2018. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.00741>.
9. Bhagoji A. N., Chakraborty S., Mittal P., Calo S. Analyzing federated learning through an adversarial lens. *International Conference on Machine Learning*. 2019, pp. 634–643.
10. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. Badnets: Identifying vulnerabilities in the machine learning model supply chain. 2017. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.06733>.
11. Liu Y., Ma S., Aafer Y. et al. Trojaning attack on neural networks. *Network and Distributed System Security Symposium*. 2018. Doi: [10.14722/ndss.2018.23300](https://doi.org/10.14722/ndss.2018.23300).
12. Wallace E., Zhao T. Z., Feng S., Singh S. Customizing triggers with concealed data poisoning. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.12563>.
13. Saha A., Subramanya A., Pirsiavash H. Hidden trigger backdoor attacks. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.00033>.
14. Turner A., Tsipras D., Madry A. Label-consistent backdoor attacks. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.02771>.
15. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. Badnets: Identifying vulnerabilities in the machine learning model supply chain. 2017. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.06733>.
16. Yao Y., Li H., Zheng H., Zhao B. Y. Latent backdoor attacks on deep neural networks. *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2019, pp. 2041–2055.
17. Li J. Z. Principled approaches to robust machine learning and beyond: PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology. Boston, USA; 2018.
18. Steinhardt J. Robust learning: Information theory and algorithms: PhD thesis. Stanford University. Stanford, USA, 2018.
19. Diakonikolas I., Kane D. M. Recent advances in algorithmic high-dimensional robust statistics. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.05911>.
20. Gao Y., Xu Ch., Wang D. et al. Strip: A defence against trojan attacks on deep neural networks. *Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Computer Security Applications Conference*. 2019, pp. 113–125.
21. Kolouri S., Saha A., Pirsiavash H. et al. Universal litmus patterns: Revealing backdoor attacks in CNNs. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020, pp. 301–310.
22. Cohen J., Rosenfeld E., Kolter Z. Certified adversarial robustness via randomized smoothing. *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2019, pp. 1310–1320.
23. Levine A., Feizi S. Deep partition aggregation: Provable defense against general poisoning attacks. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.14768>.
24. Jia J., Cao X., Gong N. Z. Intrinsic certified robustness of bagging against data poisoning attacks. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.04495>.
25. Ma Y., Zhu X., Hsu J. Data poisoning against differentially-private learners: attacks and defenses. *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2019, pp. 4732–4738.
26. Borgnia E., Cherepanova V., Fowl L. et al. Strong data augmentation sanitizes poisoning and backdoor attacks without an accuracy tradeoff. 2020. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.09527>.
27. Liu Y., Xie Y., Srivastava A. Neural Trojans. *IEEE International Conference on Computer Design (ICCD)*. IEEE. 2017, pp. 45–48.
28. Kaviani S., Sohn I. Influence of random topology in artificial neural networks: a survey. Seoul, Republic Korea: ICT Express; 2020.
29. Chen B., Carvalho W., Baracaldo N. et al. Detecting backdoor attacks on deep neural networks by activation clustering. 2018. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.03728>.
30. Wang B., Yao Y., Shan Sh. et al. Neural cleanse: Identifying and mitigating backdoor attacks in neural networks. 2019 *IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. IEEE. 2019, pp. 707–723.
31. Gao H., Chen Y., Zhang W. Detection of Trojaning Attack on Neural Networks via Cost of Sample Classification. *Security and Communication Networks – 2019*. 2019, pp. 1–12. Doi: [10.1155/2019/1953839](https://doi.org/10.1155/2019/1953839).
32. Liu Y., Lee W. C., Tao G. et al. ABS: Scanning neural networks for back-doors by artificial brain stimulation. *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2019, pp. 1265–1282.
33. Xu X., Wang Q., Li H. et al. Detecting AI Trojans Using Meta Neural Analysis. 2019. Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.03137>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Беззатеев Сергей Валентинович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – криптография, теория кодирования, информационная безопасность киберфизических систем.

**Афанасьева Александра Валентиновна**, старший преподаватель кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – криптография, теория кодирования, стеганография, информационная безопасность киберфизических систем, системы с искусственным интеллектом.

**Супрун Александр Федорович**, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора института кибербезопасности и защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Область научных интересов – криптография, информационная безопасность киберфизических систем.

**Bezzateev Sergey V.**, D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Information Security, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – cryptography, coding theory, information security of cyberphysical systems.

**Afanasyeva Alexandra V.**, Senior Lecturer at the Department of Information Security, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – cryptography, coding theory, steganography, information security of cyberphysical systems, artificial intelligence systems.

**Suprun Alexander F.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director at the Institute of Cyber Security and Information Security, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Research interests – cryptography, information security of cyberphysical systems.

Поступила в редакцию 12.01.2023

Поступила после рецензирования 20.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

Received 12.01.2023

Revised 20.01.2023

Accepted 30.01.2023



## Искусственный интеллект в управлении инновациями

Юлия Анатольевна Антохина<sup>1</sup>

antoxina@guap.ru, orcid.org/0000-0001-9438-3062

Михаил Лейзерович Кричевский<sup>1</sup>

✉ mkrichevsky@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0038-2614

Анатолий Аркадьевич Оводенко<sup>1</sup>

ovodenko@guap.ru, orcid.org/0000-0001-8913-6104

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Искусственный интеллект изменяет работу организации и управление инновациями в ней. Быстрое технологическое развитие и замена человеческой деятельности искусственным интеллектом действительно могут заставить руководство переосмыслить весь инновационный процесс организации. В работе описаны области использования искусственного интеллекта при разработке инноваций в организации. Методы машинного обучения, являющиеся составной частью искусственного интеллекта, были разработаны для анализа данных с целью классификации, прогнозирования и принятия решений, основанных на фактических данных, новыми способами. Для демонстрации возможностей искусственного интеллекта рассмотрена задача оценки цифровой зрелости организации с использованием методов машинного обучения. Необходимая для формирования модели база примеров создана посредством генерации выбранных факторов, участвующих в построении оценки. Одной из лучших подобранных по базе примеров моделей оказалась глубокая нейронная сеть с четырьмя скрытыми слоями, показавшая точность классификации, равную 95 %. Продемонстрирована возможность определения класса цифровой зрелости по выбранной модели.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, управление инновациями, цифровая зрелость организации, глубокая нейронная сеть

**Для цитирования:** Антохина Ю. А., Кричевский М. Л., Оводенко А. А. Искусственный интеллект в управлении инновациями // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 72–79. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-72-79.

Original article

## Artificial intelligence in innovation management

Yulia A. Antokhina<sup>1</sup>

antoxina@guap.ru, orcid.org/0000-0001-9438-3062

Mikhail L. Krichevsky<sup>1</sup>

✉ mkrichevsky@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0038-2614

Anatoliy A. Ovodenko<sup>1</sup>

ovodenko@guap.ru, orcid.org/0000-0001-8913-6104

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Artificial intelligence is changing how organizations work and manage innovation. In line with the rapid technological development and the replacement of human activity, artificial intelligence can indeed force the management to rethink the entire innovation process of the organization. The paper describes the areas of using artificial intelligence in the development of innovations in the organization. Machine learning methods, an integral part of artificial intelligence, have been developed to analyze data in order to classify, predict and make decisions based on evidence in new ways. To demonstrate the capabilities of artificial intelligence, the problem of assessing the digital maturity of an organization using machine learning methods is considered. The database of examples necessary for the formation of the model was created by generating the selected factors involved in the construction of the assessment. One of the best examples of models matched from the database turned out to be a deep neural network with four hidden layers, which showed a classification accuracy of 95 %. The possibility of determining the class of digital maturity according to the selected model is demonstrated.

**Keywords:** artificial intelligence, innovation management, digital maturity of organization, deep neural network

**For citation:** Antokhina Yu. A., Krichevsky M. L., Ovodenko A. A. Artificial intelligence in innovation management. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):72–79. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-72-79.

## Введение

Научный интерес к идее о том, что искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО) могут заменить людей, взять на себя их роли на рабочем месте и изменить существующие организационные процессы, неуклонно растет [1]. Основная причина такого подхода заключается в том, что при определенных ограничениях в обработке информации искусственный интеллект может обеспечить более высокое качество, большую эффективность и лучшие результаты, чем эксперты-люди. Растут опасения, что роботы и ИИ заменят многие профессии. Чтобы оставаться востребованным в этом меняющемся ландшафте карьеры, работник будущего должен обладать инновационным потенциалом, быть способным замечать возможности, трансформирующие отрасли, и предлагать творческие идеи для решения глобальных проблем. Учитывая потенциал ИИ для выполнения традиционных «человеческих» задач в организации, зададимся вопросом, можно ли использовать ИИ при формировании одного из важнейших процессов, влияющих на долгосрочное выживание и конкурентное преимущество фирмы, – инновации [2, 3]?

На первый взгляд, идея о том, что ИИ и МО могут и должны использоваться фирмами в инновационных целях, кажется почти фантастической. Ведь инновации традиционно рассматриваются как сфера деятельности людей, поскольку они обладают уникальной способностью к инновациям. Хотя ИИ может иметь недостатки по сравнению с людьми, есть несколько нетривиальных причин, по которым предприятия захотят использовать ИИ в своих инновационных процессах. Факторы, внешние по отношению к инновациям, проявляются в том, что менеджеры по инновациям все чаще сталкиваются с крайне нестабильной и меняющейся средой, еще более конкурентными глобальными рынками, конкурирующими технологиями и подчас резко меняющейся политической ситуацией. В то же время увеличилась доступность информации, которая продолжает расти. Эти тенденции обеспечивают веские доказательства того, что основой конкурентоспособности являются информация и возможности организаций по решению проблем.

Сегодня управление инновациями, созданное людьми, играет ключевую роль в организациях. Однако ИИ сумеет оказать инструментальную помощь за пределами возможностей человека. Действительно, ученые и практики утверждают, что ИИ существенно влияет на инновационные процессы фирм в будущем. Представление о том, что ИИ может применяться в условиях иннова-

ций, также подтверждается быстрым развитием ИИ и МО. Однако наши знания об ограничениях ИИ в контексте инноваций все еще довольно скудные. Использование ИИ и МО для творчества и инноваций сильно отличается от устоявшихся областей, где ИИ заменил традиционное управление [4]. Применение методов ИИ в задачах гуманитарного направления показано в наших работах [5–8].

Появившаяся в настоящее время «цифровая организация» («digitized organization») отличается высокой степенью интеграции машинного обучения с компьютеризированными знаниями. Это означает, что огромное количество процессов автоматизировано через алгоритмы. Такие сервисы взаимодействуют с клиентами и поставщиками и позволяют хранить информацию и знания.

Для лучшего понимания того, как ИИ способствует организационным инновациям, необходимо изучить обработку информации для инноваций. Инновационный процесс, который лежит в основе управления инновациями, обычно понимается как совокупность следующих этапов:

- 1) открытие, создание и генерация инновационных идей, возможностей и решений;
- 2) развитие или использование различных идей и решений;
- 3) оценка и выбор одного или нескольких наиболее перспективных решений.

Можно утверждать, что первые два шага, в частности, требуют творческого подхода и нестандартного мышления [9]. Поскольку нас интересует определение того, где и как можно использовать ИИ для поддержки принятия решений человеком в инновационном процессе, сосредоточимся на первых двух этапах, а именно – на генерации и развитии идеи.

Преодолевая барьеры между людьми и системами искусственного интеллекта, можно ввести генерации и разработки идей в рамки областей применения ИИ в инновационном процессе. Для выявления возможностей ИИ необходимо определить, где ИИ может потенциально заменить человеческое решение в управлении инновациями. В частности, есть четыре потенциальные области, в которых ИИ поддерживает процесс принятия решений человеком:

- 1) развитие идей путем преодоления ограничения обработки информации;
- 2) генерирование идей путем преодоления ограничения обработки информации;
- 3) развитие идей путем преодоления процедур локального поиска;
- 4) генерирование идей путем преодоления процедур локального поиска.

Эти четыре области показаны в таблице, где также дано краткое описание действий ИИ в каждом квадранте.

Рассмотрим области использования ИИ при разработке инноваций более подробно.

*Квадрант 1* (таблица). Современные системы ИИ преуспевают в преодолении ограничений обработки информации людьми в области развития идей и возможностей. В настоящее время такие системы в значительной степени полагаются на глубокие нейронные сети, которые способны обрабатывать огромные объемы данных. С помощью этого подхода реализуется множество систем ИИ, которые способны поддерживать людей в разработке идей, возможностей и приемов решения, анализируя гораздо больший объем информации, чем человек, и обнаруживая интересные области для исследования. Действительно, подобные технологии уже создают значительную экономическую ценность для фирм. В области квадранта 1 находится ряд интересных приложений ИИ в очень широком диапазоне областей. Это развитие тесно связано с улучшением условий для инноваций. Есть много захватывающих примеров применения систем ИИ в поиске материалов. Например, ИИ можно использовать для оптимизации компонентов батарей и солнечных элементов или для ускорения процесса открытия новых катализаторов. При нахождении новых материалов используются методы, основанные на машинном обучении, для прогнозирования наиболее перспективных материалов для тестирования, что существенно ускоряет процесс инноваций.

*Квадрант 2* (таблица). Есть несколько приложений ИИ, относящихся к этой области. Эти приложения ИИ способны обрабатывать больше информации для генерирования новых идей и возможностей, которые, вероятно, будут упущены из виду людьми, действующими самостоятельно. Типичным примером является приложение, раз-

работанное *Outlier.ai*. Компания использует продвинутый ИИ, чтобы помочь другим компаниям ежедневно выявлять важные изменения в своих важных бизнес-данных. Платформа автоматизированного бизнес-анализа *Outlier.ai* находит непредвиденные закономерности и взаимосвязи, чтобы бизнес-лидеры могли быстро улучшить качество обслуживания клиентов и использовать новые возможности для роста. *Outlier.ai* может интегрироваться с несколькими источниками данных за считанные минуты, чтобы быстро собирать информацию о бизнесе, выявлять потенциальные возможности и реагировать на непредвиденные обстоятельства. После анализа данных фирмы *Outlier.ai* генерирует набор настраиваемых «историй», в которых обобщаются полезные и интересные идеи для конкретных менеджеров. Таким образом, *Outlier.ai* может выделить инновационные возможности для менеджеров.

*Квадрант 3* (таблица). Есть некоторые первоначальные свидетельства того, что системы ИИ могут поддерживать людей в тех типах инновационной деятельности, которые представлены в этом квадранте. Эти виды деятельности включают в себя выявление и разработку идей, возможностей и подходов к решению, когда процесс выходит за рамки использования локального поиска подпрограммы – другими словами, применяется удаленный поиск. Компания *Autodesk*, например, использовала различные алгоритмы для создания новой системы разделяющей перегородки для экипажа самолета «Airbus». Методы генеративного проектирования, использованные для разработки новой перегородки, создают продукты, которые дизайнеры не смогли бы придумать самостоятельно. Алгоритмы, используемые *Autodesk*, были основаны на моделях роста улиток и строения костей млекопитающих. Такие модели позволили построить новую, более эффективную, но столь же устойчивую перегородку для экипажа. Таким образом, включив методы

- *Области применения ИИ в инновационном процессе*
- *Applications of AI in the innovation process*

Барьеры на пути инноваций	Инновационный процесс	
	разработка идей	генерация идей
Ограничения обработки информации	Система ИИ способна идентифицировать и оценивать больше информации, чем затем можно использовать для развития идей	Система ИИ способна распознавать больше проблем, возможностей и угроз, которые могут быть использованы для генерации новых идей
Неэффективные или локальные процедуры поиска	Система ИИ способна выявлять и оценивать больше творческих/исследовательских идей	Система ИИ способна распознавать и создавать больше творческих/исследовательских проблем, возможностей и угроз для генерации новых идей

искусственного интеллекта в процесс разработки, *Autodesk* и *Airbus* смогли создать более инновационное решение.

*Квадрант 4* (таблица). Системы ИИ, расположенные в этой области, должны быть в состоянии генерировать или распознавать идеи и возможности для инноваций в несвязанных областях знаний. Метод ИИ, который может облегчить генерацию или признание инновационных идей и возможностей, – это обучение с подкреплением. Недавние достижения в обучении с подкреплением, такие как неконтролируемое обучение с подкреплением и метаобучение с подкреплением, могут быть полезны для генерирования новых идей. Обучение с подкреплением в целом включает в себя обучение агента в виртуальной среде. Агент использует сигнал вознаграждения, чтобы узнать, какие действия максимизируют вознаграждение, а какие уменьшают его. Обучение с подкреплением требует, чтобы люди создавали «награды» вручную, что является нетривиальным, а иногда и неоптимальным подходом к разработке вознаграждений. Таким образом, этот метод является первым шагом к тому, чтобы алгоритмы могли научиться распознавать и достигать цели без какого-либо надзора, а это открывает интересные возможности для творчества и инноваций. Обучение с метаподкреплением решает тесно связанный с этим вопрос, касающийся использования обучения для улучшения самого процесса обучения. Достижения в этих областях должны позволить алгоритмам стать более гибкими в отношении решения новых задач, которые могут оказаться полезными в создании, обнаружении и распознавании новых творческих идей и возможностей.

## Оценка цифровой зрелости предприятия

Воспользуемся изложенными результатами и разработаем систему, основанную на методах МО, для оценки цифровой зрелости предприятия. Последний показатель характеризует уровень цифровой трансформации и является одним из критериев для оценки достижения ее целей. Цифровая зрелость означает адаптацию организации к эффективной конкуренции в цифровой среде. Речь идет о внедрении новых технологий путем согласования стратегии компании, рабочей силы, культуры, технологии и структуры, чтобы соответствовать цифровым ожиданиям клиентов, сотрудников и партнеров. Таким образом, цифровую зрелость можно считать непрерывным процессом адаптации к изменяющемуся цифровому ландшафту [10, 11].

Первые методы оценки цифровой зрелости появились в начале 2010-х гг. На этом этапе их разработчиками, как правило, являлись различные консалтинговые компании. В этой связи подавляющее большинство таких методов в своей основе не имели какого-либо теоретического обоснования. Вместе с тем они строились на широкой накопленной статистической базе, которой обладали компании, практикующие управленческий консалтинг.

К настоящему времени существуют различные модели цифровой зрелости. В качестве примера такой модели укажем модель цифровой зрелости Форестера 4.0, где применяются четыре параметра для оценки уровня цифровой зрелости [12]:

1) корпоративная культура (отношение организации к цифровым инновациям и качество взаимодействия сотрудников с информационно-коммуникативными технологиями (ИКТ), применяемыми в работе);

2) технологии (использование организацией ИКТ);

3) организация (формулировка, реализация стратегии и тактики в части цифровой трансформации);

4) инсайты (применение организацией данных о пользовательском опыте и внутренних бизнес-процессах при принятии управленческих решений).

В рамках каждого параметра авторы методологии в процессе интервьюирования предлагают задавать по семь вопросов, которые подразумевают выбор из четырех вариантов ответов («Полностью не согласен»; «Частично не согласен»; «Частично согласен»; «Полностью согласен»). В зависимости от количества набранных баллов организация может быть отнесена к одной из четырех групп:

1) «скептики» («skeptics») – организации, имеющие минимальный уровень цифровизации и недавно начавшие задумываться над возможностями цифровой трансформации;

2) «последователи» («adopter») – организации, которые активно инвестируют в развитие информационных технологий и соответствующих навыков у сотрудников;

3) «коллабораторы» («collaborator») – организации, которые активно используют цифровые решения в целях создания конкурентных преимуществ;

4) «дифференциаторы» («differentiator») – организации, использующие цифровые данные для построения эффективных каналов взаимодействия с клиентами.

В данной статье будем использовать только набор входных признаков модели Форестера, но

оценку цифровой зрелости определим с помощью методов машинного обучения.

Машинное обучение по базе примеров формирует модель, которая в дальнейшем может быть использована для других задач, например, прогнозирования. Отобранными переменными были выбраны признаки, соответствующие модели цифровой зрелости Форестера:  $X_1$  – корпоративная культура;  $X_2$  – технологии;  $X_3$  – организация;  $X_4$  – инсайты. Каждую из переменных мы оценивали в баллах в диапазоне от 1 до 10. Общий объем базы примеров составлял 40 строк, по 10 строк для каждого класса. Среди методов машинного обучения для составления методики были выбраны следующие: дерево решений, метод  $k$ -ближайших соседей, метод опорных векторов, нейронная сеть.

Кратко охарактеризуем каждый из методов, хотя по указанным приемам существует обширная литература – например [13, 14].

Основная идея *дерева решений* (Decision Tree, DT) состоит в том, чтобы разделить сложную проблему на  $n$  более мелких задач через древовидную структуру. В этом представлении каждый узел дерева определяет отдельную подзадачу, а дерево в целом дает решение общей проблемы. В начале тренировочного процесса данные, содержащиеся в наборе данных, вводятся в первый узел в верхней части дерева. После этого алгоритм DT ищет, какое значение переменной  $c_i$  разделяет набор исходных данных таким образом, чтобы минимизировать связанную с этим ошибку. Это приводит к бифуркации узла (и набора данных) на два «пути», один для значений выбранных входов – ниже  $c_i$  и второй для значений – выше  $c_i$ . Повторение этой процедуры ведет к ряду путей, связывающих каждый возможный вход с определенным выходом, в результате чего получается древовидная форма.

*Метод опорных векторов* (Support Vector Machine, SVM) направлен на поиск наилучшей гиперплоскости для разделения входных данных в зависимости от связанных с ними выходными данными. Другими словами, метод SVM определяет, какие гиперплоскости лучше разделяют пространство входов в  $n$  зонах (где  $n$  зависит от числа начальных классов), сводя к минимуму связанную с этим ошибку модели. Степень разделения этих зон может быть уточнена некоторыми гиперпараметрами метода SVM (чаще всего используемым ядром). Надежность любого приема МО зависит не только от применяемого метода, но и его гиперпараметров, которые управляются оператором и специфичны для каждой архитектуры МО.

*Метод  $k$ -ближайших соседей* ( $k$ -Nearest neighbors,  $k$ -NN) – известный метод машинного

обучения, основанный на сходстве переменных в наборе данных. Мера сходства количественно определяется путем расчета расстояний между необработанными данными в многомерном пространстве признаков. Данные, которые достаточно близки, группируются вместе, что позволяет идентифицировать кластеры данных. Как только различные группы определены посредством набора обучающих данных, метод  $k$ -NN позволяет прогнозировать класс путем сравнения с  $k$ -ближайшими соседями в многомерном пространстве признаков. Например, для случая алгоритма классификации при  $k=3$  будут рассмотрены три ближайших соседа, и, если, по крайней мере, два из трех ближайших соседей принадлежат к определенному классу, новый вход классифицируется соответствующим образом.

Архитектура *нейронных сетей* (Neural Networks, NN) воспроизводит принципы работы головного мозга человека. Каждый нейрон содержит лишь небольшую часть информации, которая распределяется между различными нейронами через их взаимосвязи (синапсы) и передается посредством электрических импульсов. Точно так же алгоритм NN опирается на взаимосвязанные нейроны (узлы), каждый из которых хранит только один малый фрагмент глобальной информации. Узлы разделены на слои, которые можно классифицировать как входные, выходные или скрытые. Число узлов во входном слое равно количеству входов модели, число узлов выходного слоя определяется количеством классов (в задаче классификации). Скрытый слой (слои) состоит из  $n$  узлов, а число скрытых слоев и узлов для каждого слоя определяется гиперпараметрами, которые необходимо оптимизировать для конкретного случая.

В работе рассматривается смоделированный набор данных (toy dataset), поскольку в машинном обучении важно научиться правильно применять игрушечные наборы данных, так как обучение алгоритма на реальных данных сопряжено с трудностями и может закончиться неудачей [15]. Разыгранные наборы данных играют решающую роль в понимании работы алгоритмов. При наличии простой синтетической выборки данных достаточно просто оценить, обучился ли алгоритм нужному правилу или нет. На реальных данных получить такую оценку сложно.

На рис. 1 показаны результаты использования четырех указанных выше методов для формирования модели по разыгранным данным в программном продукте MatLab (2021).

Как видно из рис. 1, лучшую точность классификации, равную 95 %, показали метод  $k$ -ближайших

Model Number	Model Name	Accuracy (Validation)	Last change	Features
1	Tree	77.5%	Fine Tree	4/4
2	SVM	92.5%	Linear SVM	4/4
3	KNN	95.0%	Fine KNN	4/4
4	Neural Network	95.0%	Narrow Neural Network	4/4

- *Рис. 1. Результаты классификации*
- *Fig. 1. Classification results*

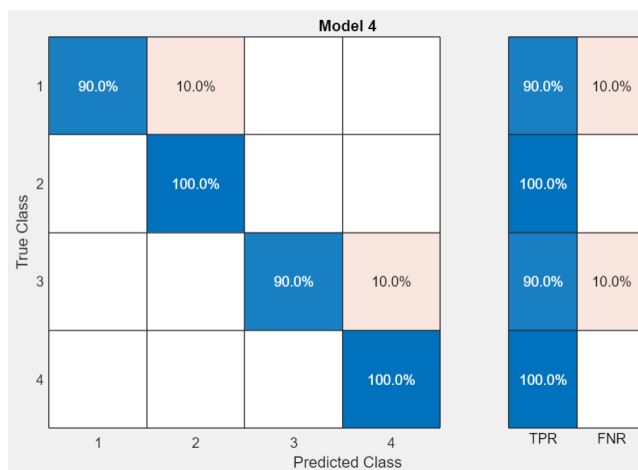
соседей и нейронная сеть. Воспользуемся последним методом и покажем некоторые результаты. По умолчанию в программе MatLab классификатор на нейронной сети имеет следующую послойную структуру (рис. 2).

Как следует из рис. 2, представленная сеть относится к классу *глубоких* нейронных сетей, так как имеет более одного скрытого слоя [16]. Подобная ситуация включена в квадрант 1 области использования ИИ в инновационном процессе (таблица). Первый слой – входной, на который поступают данные из обучающей выборки. В структуре сети имеются два полносвязных слоя (Fully Connected Layer, FC), которые умножают входные данные или данные после слоя активации на матрицу весов. Между двумя этими слоями находится слой активации «ReLu», который выполняет пороговую операцию для каждого элемента входа: любое значение меньше нуля устанавливается равным нулю. Слой «Softmax» является выходом функции активации после последнего полносвязного слоя. И, наконец, последний выходной слой «Output» формирует метку класса в задаче классификации.

На рис. 3 показана матрица ошибок для данного классификатора. Здесь матрица ошибок приведена с добавлением «Доли верных положительных классификаций» (True Positive Rates, TPR) и «Доли ложных отрицательных классификаций» (False Negative Rates, FNR), размещенных в правой части рис. 3. В последних двух столбцах справа показаны сводные данные по каждому



- *Рис. 2. Структура нейронной сети*
- *Fig. 2. Neural network structure*



- *Рис. 3. Матрица ошибок*
- *Fig. 3. Classification confusion matrix*

классу, откуда видно, что объекты второго и четвертого классов разделены безошибочно: для них значения TPR = 100 %.

Подав на вход нейронной сети вектор  $X1 = [2 \ 3 \ 3 \ 7]$ , видим, что модель выдает принадлежность данного наблюдения к классу 2:

```

>> X1 = [2 3 3 7]
>> yfit = trainedModel.predictFcn(X4)
yfit =
2.
  
```

Следовательно, организацию с таким набором входных признаков нейронная сеть отнесла к классу 2.

### Заключение

Таким образом, в работе продемонстрировано применение инновационного подхода для решения задачи по оценке цифровой зрелости. Поставленная задача решена методами машинного обучения с использованием программного продукта MatLab. Показана принципиальная возможность использования приемов искусственного интеллекта в реальных ситуациях, связанных с управленческими проблемами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Krogh G. Artificial intelligence in organizations: new opportunities for phenomenon-based theorizing // Acad. Manag. Discov. 2018. № 4. P. 404–409. Doi: <https://doi.org/10.5465/amd.2018.0084>.
2. Haefner N., Wincenta J., Paridac V. et al. Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda // Technological Forecasting and Social Change. 2021. Vol. 162. P. 120392.
3. Rampersad G. Robot will take your job: Innovation for an era of artificial intelligence // Journal of Business Research. 2020. Vol. 116. P. 68–74.
4. Chui M., Henke N., Miremadi M. Most of AI's business uses will be in two areas // Harv. Bus. Rev. 2018. URL: <https://hbr.org/2018/07/most-of-ais-business-uses-will-be-intwo-areas> (дата обращения: 07.09.2022).
5. Антохина Ю. А., Оводенко А. А., Будагов А. С. и др. Использование методов искусственного интеллекта при изучении экономических дисциплин: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 70 с.
6. Антохина Ю. А., Оводенко А. А., Лосев К. В. и др. Введение методов искусственного интеллекта в университетский гуманитарный цикл: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 77 с.
7. Антохина Ю. А., Оводенко А. А., Будагов А. С. и др. Методы искусственного интеллекта в менеджменте: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 77 с.
8. Антохина Ю. А., Оводенко А. А., Кричевский М. Л. Основы искусственного интеллекта: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 169 с.
9. Kijkuit B., Ende J. The organizational life of an idea: integrating social network, creativity and decision-making perspectives // J. Manag. Stud. 2007. № 44. P. 863–882. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2007.00695.x>.
10. Мерзлов И. Ю. Методы оценки цифровой зрелости: обзор международной практики // Креативная экономика. 2022. Т. 16, № 2. С. 503–520. Doi: 10.18334/ce.16.2.114163.
11. Kane G., Palmer D., Phillips A. et al. Achieving digital maturity. Adapting your company to a changing world. Research report // MIT Sloan Manag. 2017. Rev. 59 (1). URL: <https://sloanreview.mit.edu/projects/achieving-digital-maturity/> (дата обращения: 17.10.2022).
12. Gill M., VanBoskirk S. Digital Maturity Model 4.0. Benchmarks: Digital Transformation Playbook. URL: <https://dixital.cec.es/wp-content/uploads/presentacions/presentacion06.pdf> (дата обращения: 11.12.2022).
13. Alpaydin E. Introduction to machine learning. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010. 579 p.
14. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. N.-Y.: Pearson, 2009. 938 p.
15. Рамсундар Б., Заде Р. TensorFlow для глубокого обучения. СПб.: БХВ-Петербург, 2019. 256 с.
16. Гудфеллоу Я., Курвилль А., Бенджио И. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

## REFERENCES

1. Krogh G. Artificial intelligence in organizations: new opportunities for phenomenon-based theorizing. Acad. Manag. Discov. 2018;(4):404–409. Doi: <https://doi.org/10.5465/amd.2018.0084>.
2. Haefner N., Wincenta J., Paridac V. et al. Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda. Technological Forecasting and Social Change. 2021;162:120392.
3. Rampersad G. Robot will take your job: Innovation for an era of artificial intelligence. Journal of Business Research. 2020;116:68–74.
4. Chui M., Henke N., Miremadi M. Most of AI's business uses will be in two areas. Harv. Bus. Rev. 2018. Available from: <https://hbr.org/2018/07/most-of-ais-business-uses-will-be-intwo-areas> [Accessed 07 September 2022].
5. Antokhina Yu. A., Ovodenko A. A., Budagov A. S. et al. Use of methods of artificial intelligence in the study of economic disciplines: teaching aid. SPb.: SUAI; 2021. 70 p. (In Russ.).
6. Antokhina Yu. A., Ovodenko A. A., Losev K. V. et al. Introduction of artificial intelligence methods in the university humanities cycle: teaching aid. SPb.: SUAI; 2021. 77 p. (In Russ.).
7. Antokhina Yu. A., Ovodenko A. A., Budagov A. S. et al. Methods of artificial intelligence in management: teaching aid. SPb.: SUAI; 2021. 77 p. (In Russ.).
8. Antokhina Yu. A., Ovodenko A. A., Krichevsky M. L. Fundamentals of artificial intelligence: a tutorial. SPb.: SUAI; 2022. 169 p. (In Russ.).
9. Kijkuit B., Ende J. The organizational life of an idea: integrating social network, creativity and decision-making perspectives. J. Manag. Stud. 2007;(44):863–882. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2007.00695.x>.
10. Merzlov I. Yu. Methods for assessing digital maturity: a review of international practice. Creative economy. 2022;16(2):503–520. (In Russ.). Doi: 10.18334/ce.16.2.114163.

11. Kane G., Palmer D., Phillips A. et al. Achieving digital maturity. Adapting your company to a changing world. Research report. MIT Sloan Manag. 2017, rev. 59 (1). Available from: <https://sloanreview.mit.edu/projects/achieving-digital-maturity/> [Accessed 17 October 2022].
12. Gill M., VanBoskirk S. Digital Maturity Model 4.0. Benchmarks: Digital Transformation Playbook. Available from: <https://dixital.cec.es/wp-content/uploads/presentacions/presentacion06.pdf> [Accessed 11 December 2022].
13. Alpaydin E. Introduction to machine learning. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 2010. 579 p.
14. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. New York: Pearson; 2009. 938 p.
15. Ramsundar B., Zadeh R. TensorFlow for deep learning. SPb.: BHV-Petersburg; 2019. 256 p. (In Russ.).
16. Goodfellow J., Courville A., Bengio I. Deep learning. Moscow: DMK Press; 2017. 652 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Антохина Юлия Анатольевна**, доктор экономических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – модели инновационной стратегии вуза, ситуационное управление качеством проектов технического университета.

**Кричевский Михаил Лейзерович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бизнес-информатики и менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы искусственного интеллекта в менеджменте, анализ временных рядов, риск-менеджмент.

**Оводенко Анатолий Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, президент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы управления движущимися объектами, инновационные методы в управлении, искусственный интеллект.

**Antokhina Julia A.**, D. Sc. in Economics, Full Professor, Rector, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – models of innovative strategy of the university, situational quality management of technical university projects.

**Krichevsky Mikhail L.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Business Informatics and Management, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – artificial intelligence methods in management, time series analysis, risk management.

**Ovodenko Anatoliy A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, President, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – moving objects control systems, innovative methods in control, artificial intelligence.

Поступила в редакцию 11.01.2023  
 Поступила после рецензирования 20.01.2023  
 Принята к публикации 30.01.2023

Received 11.01.2023  
 Revised 20.01.2023  
 Accepted 30.01.2023



## Исследование особенностей применения аддитивных технологий в производственных процессах

**Сергей Валентинович Солёный<sup>1</sup>**

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

**Мария Эдуардовна Создательева<sup>1</sup>**

✉ macreatoor@yandex.ru

**Александр Владимирович Рысин<sup>1</sup>**

Galewon@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-0968-320X

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Затрагивается тема внедрения аддитивных технологий в производственный процесс, дальнейшего развития, а также возможности воспроизведения изделий из различных материалов. Исследуются особенности и условия, которые необходимо учитывать при изготовлении изделия методами аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** автоматизация, аддитивные технологии, аддитивное производство, селективное лазерное спекание, производственный процесс

**Для цитирования:** Солёный С. В., Создательева М. Э., Рысин А. В. Исследование особенностей применения аддитивных технологий в производственных процессах // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 80–84. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-80-84.

Original article

## Research of the specific application of additive technologies in production processes

**Sergei V. Solyonyj<sup>1</sup>**

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

**Maria E. Sozdateleva<sup>1</sup>**

✉ macreatoor@yandex.ru

**Aleksander V. Rysin<sup>1</sup>**

Galewon@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-0968-320X

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The publication touches on the introduction of additive technologies into the production process, considers further development, as well as the possibility of reproduction of products from various materials. Studies features and conditions, which should be considered in the manufacture of the product by methods of additive technologies.

**Keywords:** automation, additive technologies, additive production, selective laser sintering, manufacturing process

**For citation:** Solyonyj S. V., Sozdateleva M. E., Rysin A. V. Research of the specific application of additive technologies in production processes. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):80–84. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-80-84.

### Введение

Поскольку одним из факторов увеличения производительности является автоматизация, многие представители разных отраслей промышленности прибегают к оптимизации процессов производства, поэтому средствами автоматизации сегодня в той или иной степени оснащаются все существующие и строящиеся объекты и системы.

Это приводит к уменьшению финансовых затрат, человеческих ресурсов, а также сокращает временные издержки, как в отдельно взятых проектах, так и в массовом производстве.

В последние несколько лет широкое распространение в различных областях науки и промышленности получили аддитивные технологии (АТ).

Под аддитивными технологиями, или технологиями послойного синтеза, принято понимать совокупность разных технологических процес-

сов, основанных на изготовлении детали с использованием технологий послойного наращивания из различных материалов.

Это, прежде всего, инструмент механизма цифровизации подхода к моделированию, прототипированию и изготовлению объектов разной сложности.

Дальнейшее развитие АТ поможет решать такие производственные задачи, как:

- увеличение номенклатуры изготавливаемой продукции;
- уменьшение технологических ограничений на сложность деталей и узлов;
- сокращение производственного цикла;
- экономия площадей, электроэнергии;
- увеличение рентабельности производства малых серий;
- сокращение влияния «человеческого фактора» при производстве деталей.

Аддитивные технологии открывают возможность воспроизведения изделий, объектов, инженерных конструкций и механизмов, изготавливаемых по данным цифровой САД-модели. Использование таких технологий в промышленности существенно ускоряет производственный процесс, а также позволяет работать с моделями выпускаемых деталей.

### **Внедрение аддитивных технологий в производственный процесс**

Разнообразие аддитивного производства (АП) опирается на автоматическое преобразование цифровых продуктов (ЦП) в твердотельные материальные формы с помощью особых фабрикаторов – наборов взаимоинтегрированных инструментов для совместной эффективной разработки.

В целом стадии реализации проектов на базе АП от виртуального описания в системах автоматизированного проектирования (САПР) до физического изготовления детали происходят посредством единой технологической цепи.

Если для изготовления одной сложной детали традиционными методами производства может понадобиться достаточно обширный многоэтапный технологический цикл, нуждающийся в определенном оборудовании, которое, в свою очередь, требует большого количества квалифицированного персонала, то, прибегая к АП, имеется возможность заменить целую производственную линию на одну установку 3D-печати [1].

Помимо этого, стоит отметить, что при использовании технологий АП появляется возможность оперативного внесения изменений в конструк-

цию моделей и деталей, не требуется заново изготавливать литьевые формы, оснастку, штампы.

Таким образом, использование АТ имеет несколько преимуществ перед традиционными методами, а именно:

- сокращение срока изготовления сложных деталей;
- требуется меньшее количество персонала;
- экономия материала изготовления и др.

В настоящих условиях АТ являются одним из приоритетных механизмов развития направлений Индустрии 4.0, представляют новые современные инженерные решения, применение которых поможет расширить горизонты высокотехнологичных проектов.

Решая поставленную производственную задачу, необходимо определить, насколько целесообразно внедрение аддитивных технологий в классический процесс изготовления изделия.

Необходимо учитывать, что при внедрении АТ не должны уменьшаться объемы производства, а также изменяться технические характеристики изделия. Для этого необходимо провести анализ традиционных методов производства, вычислить себестоимость одного изделия, количество времени на его производство, провести анализ относительно того, удовлетворяет ли объем производства заявленному запросу, произвести выбор методов и средств аддитивных технологий в соответствии с характеристиками изделия, провести расчет себестоимости изделия, выполненного с помощью аддитивных технологий, выполнить сравнительный анализ показателей разных методов производств.

Для правильного выбора методов и средств аддитивных технологий и, как следствие, для удовлетворения вышеперечисленных условий необходимо учитывать различные особенности применения той или иной аддитивной технологии.

Так, материалы в аддитивном производстве выбираются в зависимости от используемой технологии, которая преобразует материал, воздействуя на него внешним источником энергии, например, теплом, светом, лазерным излучением и другими видами энергии. Способность материала удовлетворительно реагировать на определенный вид энергии связывает его с технологией, которая позволит решить поставленную перед АП задачу [2].

В настоящее время не существует четко установленной классификации АТ, однако они представляются рядом способов печати, которые варьируются в зависимости от используемого материала, а также способа его нанесения.

Исходные материалы делят на полимеры, металлы, керамику и композиционные вещества.

Полимеры можно разделить на:

1) высокоэффективные – такие материалы имеют исключительную стойкость к воздействию окружающей среды, долговечны, в некоторых случаях достигают уровня механических свойств, обычно присущих металлам, а также могут работать в экстремальных условиях при повышенных температурах. К этой категории относят такие полимеры, как РЕЕК, РЕКК (полиэфирэфиркетоны), Ultem (полиэфиримид), зачастую их используют в машиностроении, авиакосмической и оборонной промышленности.

Из недостатков данного материала можно отметить относительную высокую стоимость, а также необходимость в постобработке в строго контролируемых условиях, обеспечивать которые могут только 3D-принтеры промышленного класса;

2) инженерные – материалы, которые характеризуются устойчивостью к воздействию химических веществ, температуре, механическим и ударным нагрузкам [3]. К этой категории относят PC-ABS (поликарбонат/акрилонитрил-бутадиен-стирол), PA (полиамид), PC (поликарбонат), PET (полиэтилентерефталат);

3) потребительские – это категория наиболее дешевых полимеров, устойчивость которых ограничена к внешним условиям и обладает сравнительно низкими механическими свойствами. Полимеры этой категории успешно используются для быстрого прототипирования. К ним относятся PLA (полилактид), PP (полипропилен), HIPS (полистирол) [4].

Металл для использования на 3D-установках применяется в виде мелкодисперсных гранул, при его создании задаются величина и состав зерна, на этом этапе важно соблюсти соотношение крупных и мелких зерен, поскольку это определяет текучесть материала.

В основном величина зерна варьируется от 4 до 80 мкм, эта величина определяет толщину будущего напечатанного на 3D-установке изделия.

К металлам относят разного рода сплавы – алюминиевые, никелевые, титановые, кобальтовые, медные, а также инструментальную и нержавеющей сталь.

Изделия, изготовленные с помощью 3D-печати керамикой, отличаются малой плотностью, легкостью, износостойкостью, высокой механической прочностью, имеют диэлектрические свойства, обладают радиационной устойчивостью, что позволяет использовать их в атомной промышленности. Более того, некоторые изделия используют для замены костных структур в теле человека.

В ходе развития АТ появились фотополимеры, в частности, смола, которая изменяет свои свой-

ства под воздействием ультрафиолетовых лучей. Такой материал может применяться как в промышленном, так и в профессиональном производстве. Большое количество видов делает возможным применение материала в разнообразных сферах жизни – от производства обуви до разработки авиакосмических устройств.

Основными преимуществами смол можно назвать следующие:

- гладкая поверхность и высокая детализация изготовленных из смолы изделий;

- изменяющаяся геометрическая прогрессия объектов и проработка мелких деталей;

- сравнительно небольшой расход материала по сравнению с иными принтерными жидкостями.

Изделие из смолы может быть изготовлено в любой цветовой гамме; смола может быть как жесткой, так и эластичной. При изготовлении объекта из такого материала может быть выставлен любой уровень прозрачности.

На сегодняшний день представлено достаточно обширное количество аддитивных технологий, которые отличаются и могут быть классифицированы в зависимости от последовательности выполнения действий, а также материалов, которые приведут к созданию изделия. Использование каждой из них подразумевает свои особенности и условия, которые необходимо учитывать при изготовлении изделия.

В качестве примера назовем селективное лазерное спекание (SLS-метод) – принцип действия этой технологии заключается в точечном спекании порошкообразных материалов с разными компонентами лазерным лучом. Технологический процесс представляет собой нагревание области печати и камеры с порошком, после чего тонкий слой порошка распределяется по рабочей платформе, сканируется контур следующего слоя и материал выборочно спекается. Поперечное сечение компонента спекается полностью, поэтому деталь получается монолитной. Когда слой завершен, рабочая платформа движется вниз, и поверхность покрывается порошком, процесс повторяется до полного изготовления детали [3].

Достоинствами этого метода являются возможность использования ряда материалов, таких как металл, керамика и полимерные материалы; низкий показатель напряжения и деформации выпускаемых деталей; возможность использовать материал вторично.

К недостаткам метода относят уходящие на подогрев рабочего пространства энерго- и временные затраты, а также необходимость в дополнительной механообработке.

Типы производственных расходов при использовании SLS-технологии:

1) затраты на подготовку данных –

$$D_1 = (T_1 C_1) / N,$$

где  $D_1$  – затраты на подготовку данных;  $T_1$  – время для подготовки данных;  $C_1$  – стоимость оплаты труда;  $N$  – общее количество деталей;

2) затраты на подготовку и загрузку машины –

$$Z_1 = (T_2(C_3 + C_1)) / N_1,$$

где  $Z_1$  – затраты на подготовку и загрузку машины;  $T_2$  – время подготовки установки;  $C_3$  – затраты на электроэнергию;  $C_1$  – стоимость оплаты труда;  $N_1$  – количество деталей за одну загрузку;

3) затраты во время работы машины –

$$R_{m1} = ((M_m + M_m K_m) C_m + (V_m / (P_m K_n)) + T_c (h / S_h) C_3) / N_1,$$

где  $R_{m1}$  – затраты во время работы машины;  $M_m$  – масса детали;  $K_m$  – коэффициент материальных потерь;  $C_m$  – стоимость материалов;  $V_m$  – объем деталей в камере;  $P_m$  – скорость выращивания детали;  $K_n$  – коэффициент использования лазера;  $T_c$  – время нанесения одного слоя порошка;  $h$  – высота изделия;  $S_h$  – толщина одного слоя;  $C_3$  – затраты на электроэнергию;  $N_1$  – количество деталей за одну загрузку;

4) затраты на очистку машины и детали –

$$O_1 = (T_{o.и} C_3 + T_{o.м} C_1) / N_1,$$

где  $O_1$  – затраты на очистку машины и детали;  $T_{o.и}$  – время очистки детали;  $C_3$  – затраты на электроэнергию;  $T_{o.м}$  – время очистки машины;  $C_1$  – стоимость труда;  $N_1$  – количество деталей за одну загрузку.

Итоговые затраты можно определить как сумму всех затрат плюс затраты на термообработку и механическую обработку:

$$P_1 = D_1 + Z_1 + R_{m1} + O_1 + C_T + C_M,$$

где  $P_1$  – итоговые затраты;  $D_1$  – затраты на подготовку данных;  $Z_1$  – затраты на подготовку и загрузку машины;  $R_{m1}$  – затраты во время работы машины;  $O_1$  – затраты на очистку машины и детали;  $C_T$  – затраты на термообработку;  $C_M$  – затраты на механическую обработку.

## Заключение

Применение аддитивных технологий для производства изделий в разных областях науки и жизнедеятельности человека имеет ряд особенностей и условий, которые необходимо учитывать в зависимости от выбора используемой технологии, а также материала.

Внедрение АТ обусловлено потребностью в оптимизации процессов производства вследствие необходимости сокращения финансовых затрат, человеческих ресурсов, а также временных издержек, снижения влияния человеческого фактора на производственных процессах, минимизации травматизма сотрудников.

Также немаловажным является факт того, что в условиях современного быстроменяющегося рынка увеличивается спрос на количество выпускаемой продукции, что, безусловно, влечет за собой наращивание производственных объемов, а внедрение аддитивных технологий позволит не только сохранить, но и увеличить показатель качества выпускаемой продукции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О. Н. Гончарова, Ю. М. Бережной, Е. Н. Бессарабов, Е. А. Кадамов // Вестн. Дона. 2016. № 4. С. 33.
2. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы: базовые принципы. М., 2020. 12 с.
3. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.

## REFERENCES

1. Goncharov O. N., Berezhny Yu. M., Bessarabov E. N., Kadamov E. A. Additive technologies – dynamically developing production. Don Messenger. 2016;(4):33. (In Russ.).
2. GOST P 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive technological processes: basic principles. Moscow, 2020. 12 p. (In Russ.).
3. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. Additive technologies in mechanical engineering. SPb.: Polytechnic University Publishing House; 2013. 222 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Солёный Сергей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, мехатроника и робототехника.

**Создательева Мария Эдуардовна**, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, мехатроника и робототехника.

**Рысин Александр Владимирович**, старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, мехатроника и робототехника.

**Solyonyj Sergei V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electricity and electrical engineering, mechatronics and robotics.

**Sozdateleva Maria E.**, Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electricity and electrical engineering, mechatronics and robotics.

**Rysin Aleksander V.**, Senior Lecturer at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electricity and electrical engineering, mechatronics and robotics.

Поступила в редакцию 20.09.2022

Поступила после рецензирования 10.10.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Received 20.09.2022

Revised 10.10.2022

Accepted 30.01.2023

## Оптимизация графических изображений в системе Adobe Photoshop

Софья Николаевна Федосеева<sup>1</sup>

✉ daveroom@mail.ru

Евгений Евгеньевич Майоров<sup>1</sup>

majorov\_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** В настоящее время широко распространено использование графических изображений для предоставления информации на различных информационных ресурсах, таких как web-сервисы. При осуществлении глобальных проектов количество мультимедиа в информационной системе увеличивается и скорость загрузки web-страницы повышается. В данной статье рассматриваются варианты оптимизации графики в программе Adobe Photoshop для ускорения работы web-сервисов.

**Ключевые слова:** графические изображения, оптимизация графики, дизайн, JPEG, GIF, мультимедиа, Adobe Photoshop, коэффициент сжатия, формат файла, качество изображения, параметры сжатия, сжатие для web

**Для цитирования:** Федосеева С. Н., Майоров Е. Е. Оптимизация графических изображений в системе Adobe Photoshop // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 85–93. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-85-93.

Original article

## Optimization of graphic images in the system Adobe Photoshop

Sofya N. Fedoseeva<sup>1</sup>

✉ daveroom@mail.ru

Evgeny E. Mayorov<sup>1</sup>

majorov\_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Currently, the use of graphic images to provide information on various information resources, such as web services, is widespread. When implementing global projects, the amount of multimedia in the information system increases and the speed of loading a web page significantly increases. This article discusses options for optimizing graphics in Adobe Photoshop to speed up the work of web services.

**Keywords:** graphic images, graphics optimization, dithering, JPEG, GIF, multimedia, Adobe Photoshop, compression ratio, file format, image quality, compression parameters, compression for the web

**For citation:** Fedoseeva S. N., Mayorov E. E. Optimization of graphic images in the system Adobe Photoshop. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(1):85–93. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-85-93.

### Введение

В наше время каждый человек сталкивается с мультимедиаинформацией. Мультимедиа – это совокупность информационных сред, таких как звук, компьютерная графика, анимация, фотоизображения и др. Самым распространенным, качественным и исчерпывающим методом предоставления информации является визуализация. Визуализация представляет собой наглядное изображение доставляемой информации при помощи рисунков, фотографий, чертежей, графиков, диаграмм и других подобных средств. Использование каждого графического средства

в информационных системах, глобальной сети Интернет, к примеру, в презентациях, видеороликах либо на web-сайтах, требует грамотной оптимизации качества и размера файла.

Необходимость оптимизации напрямую связана со скоростью загрузки системы. Высокая скорость загрузки страниц зависит от размера сохраняемых файлов. Суть оптимизации файлов заключается в выстраивании баланса между сохранением приемлемого качества графического изображения и уменьшением объема файла. В процессе оптимизации можно изменять не только размер файла, но, при необходимости, и его тип. Большинство программ, требующих оптими-

зации файла, имеют встроенный функционал оптимизации, который, к сожалению, не всегда может предоставить оптимальное и необходимое качество файла. Зачастую эта функция называется сжатием файла, что подразумевает то, что не учитывается степень качества изображения.

Большинство документов, необходимых для передачи данных, необходимо оптимизировать. Немаловажным разделом оптимизации является оптимизация графических изображений для web-сервисов. Время загрузки графики на сайтах занимает бóльший промежуток, чем время загрузки, к примеру, текстовой информации. Соответственно, графические изображения для web-страниц необходимо оптимизировать, в первую очередь, для увеличения скорости загрузки сайта.

Существует несколько способов оптимизации web-графики, такие как масштабирование изображений, сжатие, ввод на сайт «отзывчивых» изображений, автоматически изменяющих свой масштаб под размер дисплея гаджета, на котором отображается web-сервис, использование определенных графических форматов, использование спрайтов, индексации и т. д. Часть методов используется в процессе подготовки изображения к web-сервису, а другая часть – во время написания кода web-сайта. В данной статье рассмотрены методы предобработки графических файлов при помощи функций программы Adobe Photoshop [1].

## Оптимизация изображений

При использовании графики в web-страницах следует учитывать ряд факторов, среди которых важнейшие – это время загрузки страницы и качество изображений. Необходимо грамотно выбирать формат файла. От формата зависят способы сжатия изображений, преимущественный вариант сжатия файла. Большинство графических изображений уникальны и требуют выбора определенного формата под конкретный тип изображения. Такой подбор компромиссного значения параметров сжатия и сохранения оптимального качества называется оптимизацией. В процессе оптимизации важнейшими элементами являются характеристики качества и уровня сжатия, поиск оптимальной комбинации количества цветов.

Оптимизация графики включает в себя следующие действия:

1) выбор формата файла. Выбор подходящего для вида изображения формата файла может существенно уменьшить его размер. Форматы файлов отличаются методами сжатия информации о цвете;

2) установка зависящих от формата параметров. У каждого формата изображения имеются уникальные, собственные параметры. Некоторые форматы, например, JPEG, позволяют управлять степенью сжатия изображения. А параметр «Глубина цвета» позволяет уменьшить размер файла;

3) коррекция цветов изображения. Данный пункт актуален только для 8-битных форматов (к примеру, GIF). Процесс коррекции цветов изображения включает в себя определение цветовой палитры изображения, т. е. ограничение количества цветов и выбор определенного количества, используемого в графическом файле. В цветовую палитру можно добавлять новые цвета, необходимые для увеличения качества изображения, или удалять неиспользованные. Чем меньше цветов содержится в палитре, тем меньше цветов будет в изображении. При этом размер файлов, сохраненных в использующих палитру форматах, уменьшается [2]. Чем меньше количество цветов в палитре, тем меньше размер файла.

Для выбора оптимального соотношения между качеством и размером файла необходимо провести эксперимент с использованием доступных настроек оптимизации для тестовых изображений.

Тестовое полутоновое цветное изображение в формате BMP должно содержать как области с плавными цветовыми переходами, так и мелкоструктурные области. Выбранное изображение необходимо сохранить в формате JPEG, с максимально возможной степенью сжатия, соответствующей пороговому уровню заметности искажений (рис. 1). Изображение, показанное на рис. 1, содержит мелкоструктурные элементы, такие как шерсть животного и трава, и плавные переходы, такие как размытие заднего плана.

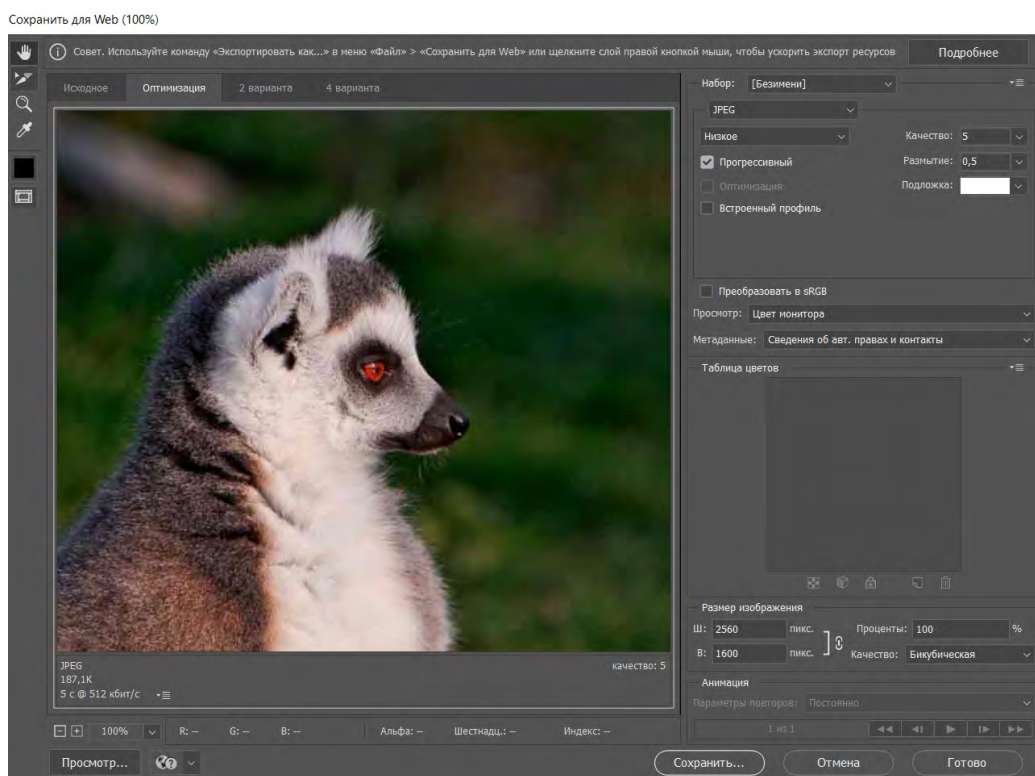
В процессе сжатия были выбраны следующие параметры (рис. 2). Уровень качества сжатия –



• Рис. 1. Тестовое изображение для конвертации в формате JPEG

• Fig. 1. Test image for conversion in JPEG format





• *Рис. 2. Параметры сжатия первого тестового изображения*  
 • *Fig. 2. Compression parameters of the first test image*

низкий. Самый оптимальный параметр качества, настраивающий баланс между качеством изображения и степенью сжатия без видимых изменений, – 5. Коэффициент размытия изображения для снижения искажений выбран на уровне 0,5. Данный параметр сильно экономит размер файла при его увеличении, но значительно понижает качество изображения. Максимальный уровень – 2, выбран оптимальный вариант размытия 0,5. Выбран прогрессивный формат изображения, в противовес оптимизированному. Версия оптимизации создает файл с оптимизированным цветом и незначительным уменьшенным размером файла. Версия прогрессивного формата представляет поочередно все более детализированные версии целого изображения по мере поступления данных при загрузке. Видимой разницы между этими двумя форматами не наблюдается, размер изображения меньше при формате прогрессивном.

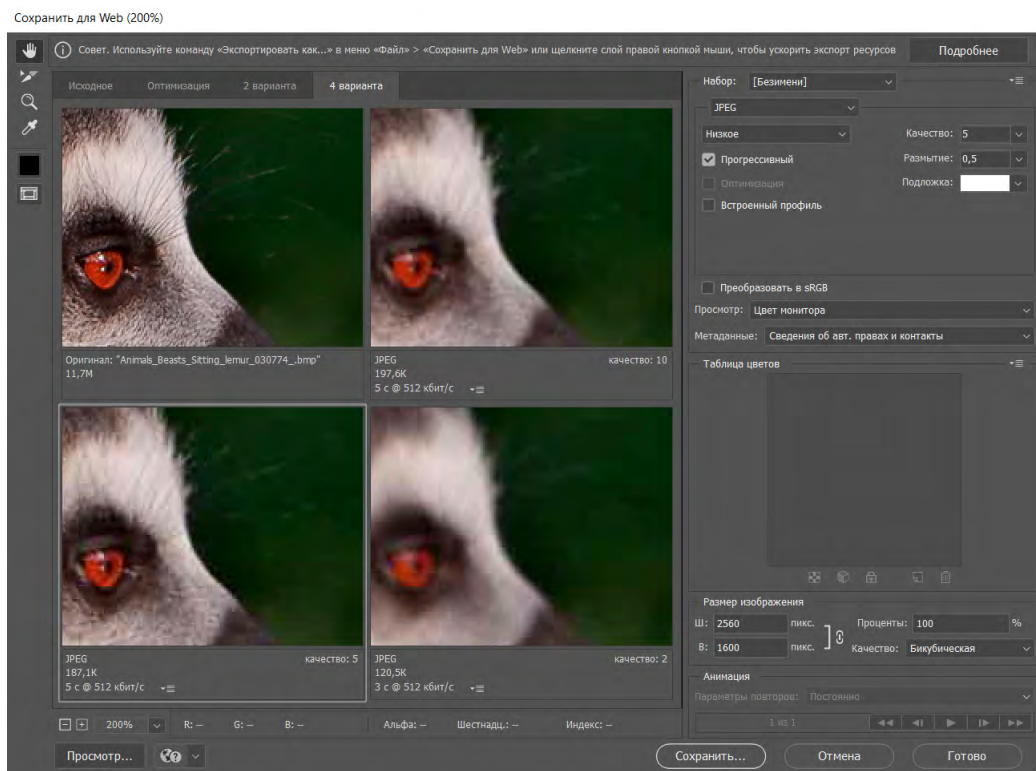
В управлении цветом содержится ICC-профиль. Это набор данных, характеризующий устройство цветного ввода или вывода. Профили ICC используются для преобразования цвета на пути от устройства к устройству, например, на пути от графического файла до изображения на мониторе или от графического файла до распечатанного принтером изображения. Основная

цель использования – получение цвета, максимально близкого к натуральному, вопреки дефектам носителей, наподобие низкой контрастности экрана или низкого качества чернил. Пункт «Встроенный профиль» подключает в файл ICC-профиль, основанный на цветовой компенсации в Photoshop. Использование данной функции не актуально для данного изображения, так как ICC-профиль увеличивает размер файла.

Значение «sRGB» («standart RGB») является стандартом представления цветового спектра с использованием модели RGB. RGB (аббревиатура от английских слов «red», «green», «blue», в переводе – «красный», «зеленый», «синий») – аддитивная цветовая модель, описывающая способ кодирования цвета для цветопроизведения при помощи трех цветов, называемых основными. Выбор основных цветов обусловлен особенностями физиологии восприятия цвета сетчаткой человеческого глаза. Преобразование цветов изображения в sRGB повышает размер файла, соответственно, преобразование для данного изображения не производится [4].

Рассмотрено четыре варианта оптимизации выбранного изображения. Варианты оптимизации настраивали вручную (рис. 3). Для наглядности изменений выбран более крупный участок изображения, содержащий и мелкоструктурные





• *Рис. 3. Варианты оптимизации изображения для JPEG*  
 • *Fig. 3. Image optimization options for JPEG*

элементы (шерсть и глаза лемура), и варианты плавного перехода (задний фон изображения). Выбранный формат сжатия выделен на изображении и является третьим по счету. Первый вариант – оригинал, и его размер – 11,7 М. Второй вариант: качество уровня – 10, размытие – 1, размер – 197,6 К. Третий: качество – 5, размытие – 0,5, размер – 187,1 К. Четвертый: качество – 2, размытие – 2, размер – 120,5 К.

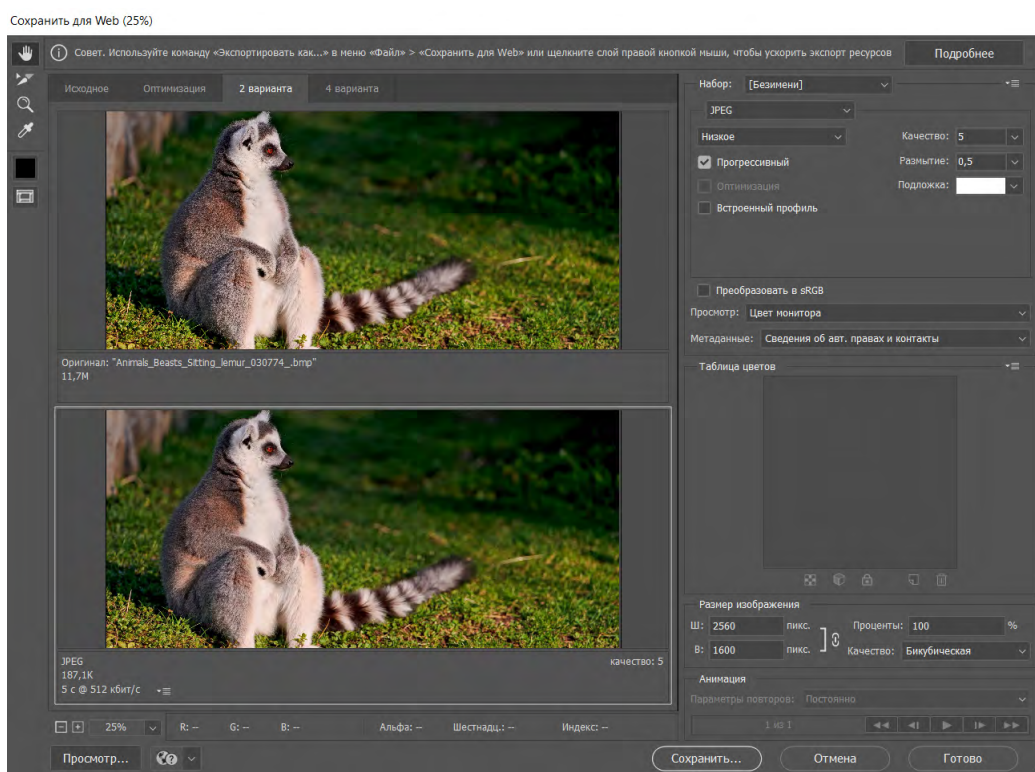
Последний вариант имеет наименьший размер файла, но и существенные потери качества, вплоть до потерь мелкоструктурных элементов: не видны усы лемура и блики на глазах. Второй вариант имеет самый высокий размер изображения, но за счет высокого уровня размытия сильно выделяются края пикселей на мелкоструктурных участках изображения. Повышенный уровень качества до параметра 10 не улучшает внешний вид изображения. Третий вариант имеет пониженный уровень качества и пониженный уровень сглаживания, благодаря этому мелкоструктурные элементы остаются более четкими, а имеющегося сглаживания хватает для сглаживания углов пикселей на плавном цветовом фоне. При данных параметрах изображение потеряло четкость отображения ворса шерсти животного, но при полном рассмотрении изображения эта деталь несущественна (рис. 4).

Итоговое изображение выглядит более плавным и весит значительно меньше изначального (рис. 5). Начальное изображение имеет размер 2693 КБ, а конечное – 188 КБ.

Коэффициент сжатия – основная характеристика алгоритма сжатия. Он определяется как отношение объема исходных несжатых данных к объему сжатых данных, т. е. коэффициент данного сжатия равен  $2693 \text{ КБ} / 188 \text{ КБ} = 14,32$ . Рассчитаем степень сжатия, равную  $188 \text{ КБ} / 2693 \text{ КБ} \times 100 \% = 7 \%$ .

Для данного изображения эффективен баланс между качеством и уровнем сжатия на уровне от 10 до 5, так как при уровне ниже 5 появляются заметные изменения. Наибольшие потери качества несут в себе мелкоструктурные элементы изображения. Степень размытия необходимо применять, так как она снижает размер файла и сглаживает резкие элементы потери качества, но наименьшую, так как от размытия страдают мелкоструктурные элементы, преобладающие в изображении. Параметры прогрессивной загрузки изображения и решение не преобразовывать цвета в sRGB приняты из соображений максимального снижения размера файла и невнесения существенных изменений во внешний вид изображения.

Рассмотрим второе тестовое изображение для проведения оптимизации в формате GIF. При



- *Рис. 4. Итоговое изображение*
- *Fig. 4. Final image*

Имя	Даты	Тип	Размер	Теги
1_Итоговое.jpg	04.10.2022 22:55	Файл "JPG"	188 КБ	
1_Начальное.bmp	22.09.2022 0:06	Файл "BMP"	2 693 КБ	

- *Рис. 5. Итоговые значения размеров первого тестового и конечного изображений*
- *Fig. 5. Final size values of first test and final images*

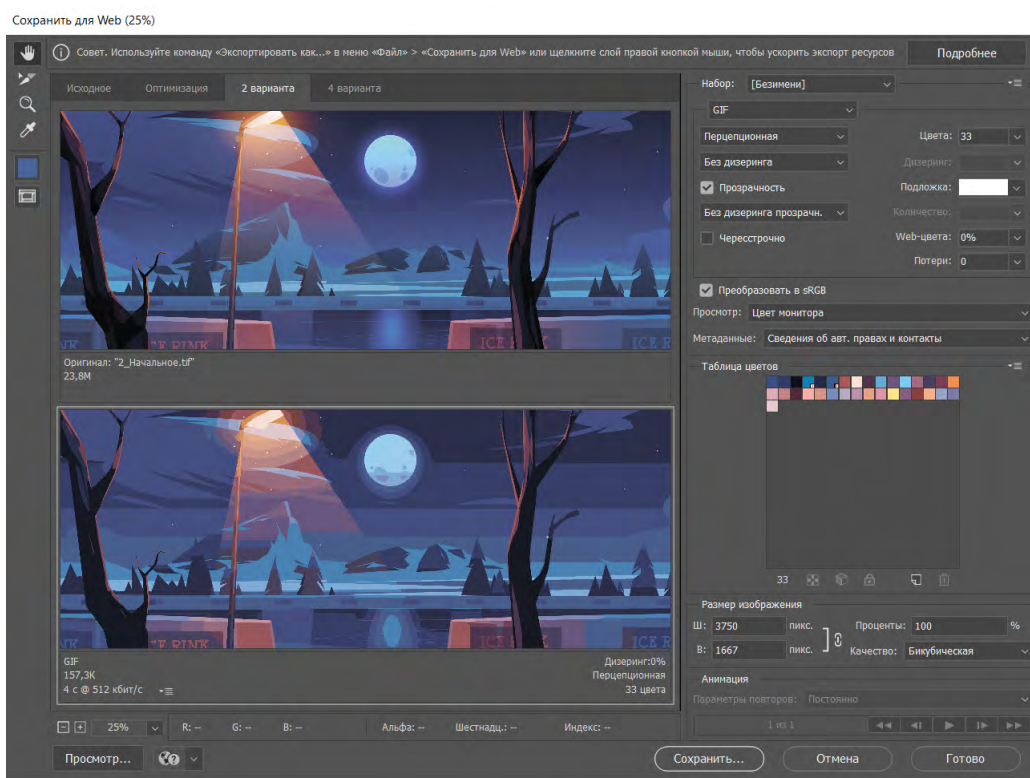
выборе следует учитывать особенности формата, который не предназначен для полутоновых изображений фотографического качества. Необходимо выполнить исследование, заключающееся в сопоставлении результатов записи изображения при использовании всех предусмотренных данным форматом параметров, включая выбор цветовой палитры, глубины цвета, опцию удаления неиспользуемых цветов, дизеринг и т. д. Выбранное изображение представлено в формате TIFF (рис. 6).

При оптимизации изображения был выбран вариант итогового изображения, показанный на рис. 7. Формат файла выбран GIF с палитрой из 32 цветов. Для минимизации потерь качества добавлен еще один цвет при помощи «пипетки» (не отображались контуры правых гор). Изначальную палитру подбирали автоматически. Поскольку данный формат файла не предусмотрен для полутоновых изображений, качество отображения градиента на картинке существенно снизилось.

Дизеринг, или дитеринг, – это процесс подмешивания в первичный сигнал, при обработке цифровых сигналов, псевдослучайного шума со специально подобранным спектром. Дизеринг применяется при обработке цифрового звука, видео или графической информации для уменьшения негативного эффекта от квантования. Итоговый вариант конвертированного изображения не имеет дизеринга, так как данный процесс либо существенно снижает качество изображений, либо в формате без снижения качества повышает размер изображения. Пороговое значение допустимости дизеринга – 25 %. Изображение с дизерингом при 25 % имеет размер 166,4 КБ, с дизерингом 0 % – 157,3 %. Модель редукции цвета – перцепционная. Также к изображению подходит адаптивная модель редукции, но размер файла с адаптивной моделью повышается в два раза, а разницы в качестве изображения незначительны. Селективная, ограниченная и остальные модели сильно понижают качество изображения.



- *Рис. 6. Начальное изображение для конвертации в GIF*
- *Fig. 6. Initial image for conversion to GIF*



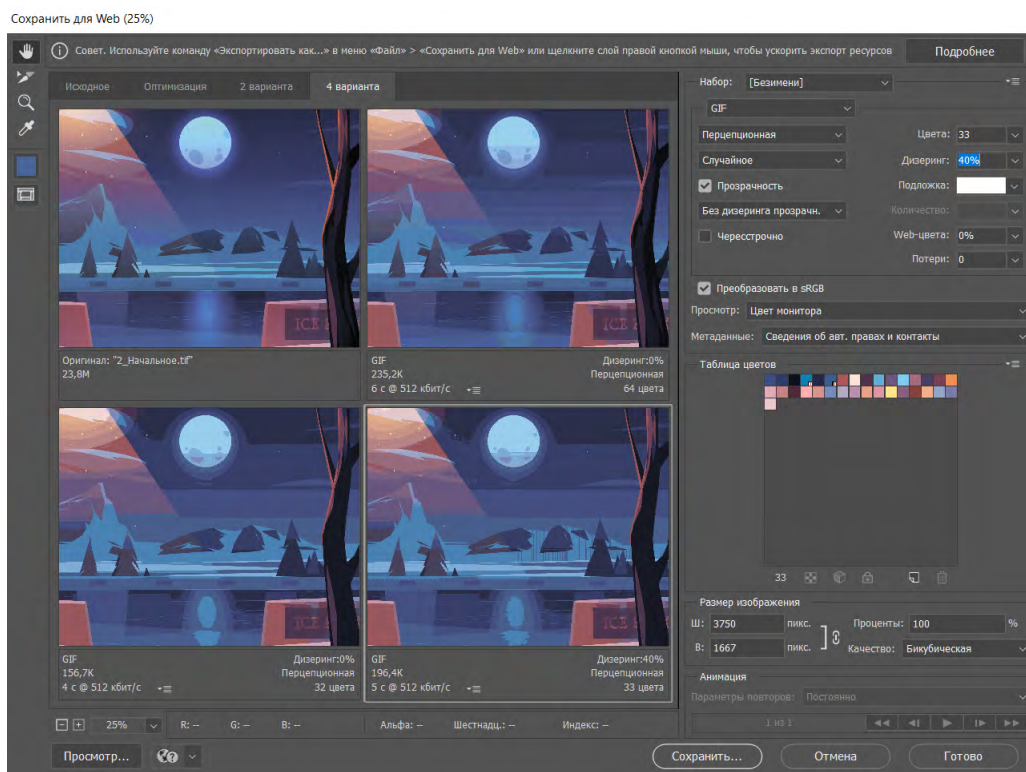
- *Рис. 7. Итоговая оптимизация изображения в GIF*
- *Fig. 7. Final image optimization to GIF*

Потери имеют значение 0 %, так как сильно понижают качество изображения (до 10 % понижение качества несущественно, но и размер файла не уменьшается). Web-цвета имеют значение 0 %, сильно меняется цветовая палитра изображения, а также критично понижается качество отображения. Данная функция неактуальна, так как рассчитана на старое отображение браузеров, поддерживающее только ограниченное количество цветов, а также для устаревших 8-битовых мониторов. Формат «чересстрочно», обозначаю-

щий постепенную загрузку изображения, не подключен, так как сильно повышает размер файла.

На втором из четырех изображений показан проблемный участок оригинала файла (рис. 8). На крайнем справа верхнем изображении отображен вариант оптимизации изображения, включающий в себя цветовую палитру из 64 цветов, с вышеупомянутыми значениями модели редукции цвета, пороговым значением оптимизации для web-цветов и потерями. Данный формат оптимизации – без дизеринга, также несколько цве-





- *Рис. 8. Сравнение различных способов оптимизации в GIF*
- *Fig. 8. Comparison of different optimization methods to GIF*

2_Конечное.gif	05.10.2022 3:10	Файл "GIF"	158 КБ
2_Начальное.tif	21.11.2019 17:32	Файл "TIF"	27 945 КБ

- *Рис. 9. Окончательные файлы после преобразования в GIF*
- *Fig. 9. Final files after conversion to GIF*

тов в палитру добавлены вручную. Размер файла составляет 235,2 КБ.

Вариант оптимизации файла снизу справа на рис. 8 представлен 33 цветами, с дизерингом в 40 %. Значение дизеринга увеличило размер файла до 196,4 КБ и добавило значительные искажения на изображение (полосы на горах, точки на Луне, на небе и на воде). Нижний слева вариант изображения (рис. 8) – выбранный конечный вариант сжатия.

На рис. 9 показаны окончательные файлы с отображением размера. Начальный файл имеет размер 27 945 КБ, а окончательный – 158 КБ. Коэффициент сжатия равен  $27\,945\text{ КБ} / 158\text{ КБ} = 176,8$ . Рассчитаем степень сжатия, равную:  $158\text{ КБ} / 27\,945\text{ КБ} \cdot 100\% = 0,5\%$ .

Проведено сжатие изображения в формат GIF. Для данного изображения невозможно избежать потерь качества при переводе в указанный формат из-за наличия градиента на изображении. Наибольшие проблемы со сжатием имеют имен-

но участки, содержащие градиентный переход цветов. Для данного файла более эффективным вариантом является добавление цветов в палитру. Изображение не имеет большого количества цветов, и необходимые цвета возможно добавить вручную. Дизеринг для данного изображения не является эффективным методом оптимизации, так как существенно снижает уровень качества отображения файла. Оптимальная палитра содержит 32 цвета, и необходимые добавленные цвета (33 цвета). При меньшем количестве цветов изображение практически нечитабельно.

## Заключение

В результате проведения эксперимента мы выяснили, что формат JPEG хорошо передает цветовые и тоновые раскаты, размытые границы, содержащиеся на таких видах изображений, как фотографии. JPEG-файл выгодно масштабиру-

ется в браузере, при этом ограниченно передает ровные плоскости цвета. При сравнении уровня компрессии JPEG-формата и GIF-формата установлено, у GIF уровень выше. GIF-формат корректно передает ровные плоскости цвета и жесткие границы. Например, векторную графику и логотипы лучше конвертировать в GIF-формат, который имеет максимальную компрессию, допускает прозрачный фон, но следует учитывать, что процесс масштабируемости в браузерах может пройти с потерями и искажением цветовых и тоновых раскатов.

Необходимость предобработки изображений перед использованием и включением файлов в структуру web-сайта неоспорима. Размер рас-

смотренных файлов значительно уменьшен – в 14 и даже 176 раз. Итоговые значения достигли порогового значения оптимизации и не имеют существенных потерь качества. Программное средство Adobe Photoshop располагает всем необходимым функционалом для проведения качественной оптимизации изображений. При подобной обработке изображений скорость загрузки web-приложений значительно увеличится, и можно будет ограничиться только одним методом оптимизации графики, без использования дополнительных методов, которые могут оказаться более трудоемкими, так как проводятся во время обработки кода приложения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adobe products. Photoshop. Официальный сайт. URL: <https://www.adobe.com/ru/products/photoshop.html> (дата обращения: 09.10.2022).
2. *Christensen J. M.* Managing design complexity: using stochastic optimization in the production of computer graphics: diss. ... degree: Ph. D. Cambridge: Harvard University, 1995.
3. Компьютерная графика и Web-дизайн: учеб. пособие / [С. А. Ишков и др.]. Самара: Изд-во СГАУ, 2007. 21 с. (Высшее образование). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19590990> (дата обращения: 09.10.2022).
4. *Сафронов А. И.* Основы работы с элементами векторной графики в Web-приложениях на базе фреймворка vue.js: учеб.-метод. пособие для проведения лаборатор. работ и практ. занятий по дисциплине «Компьютерная графика и техническое зрение» / под ред. О. Е. Пудиков. М.: Изд-во Рос. ун-та транспорта, 2020. 79 с. (Высшее образование).
5. *Османи Э.* Оптимизация графики для веба: самое важное. Официальный сайт Google для помощи и обучения разработчиков web.dew. URL: <https://web.dev/fast/#optimize-your-images/> (дата обращения: 09.10.2022).
6. *Уткина А.* Развитие информационных технологий в 2022 году. URL: <https://tproger.ru/articles/tendencii-razvitija-it-2022/> (дата обращения: 09.10.2022).

## REFERENCES

1. Adobe products. Photoshop: Official website. Available from: <https://www.adobe.com/ru/products/photoshop.html> [Accessed 09 October 2022].
2. Christensen J. M. Managing design complexity: using stochastic optimization in the production of computer graphics: diss. ... degree: Ph. D. Cambridge: Harvard University; 1995.
3. Ishkov S. A. et al. Computer Graphics and Web Design: textbook. Samara: SSAU Publishing House; 2007. 21 p. (Higher education). (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19590990> [Accessed 09 October 2022].
4. Safronov A. I. Basics of working with vector graphics elements in Web applications based on the vue framework.js: educational and methodical manual for laboratory work and practical training in the discipline «Computer graphics and technical vision» / eds by O. E. Pudikov. Moscow: Publishing House of the Russian University; 2020. 79 p. (Higher education). (In Russ.).
5. Osmani E. Optimizing graphics for the Internet: the most important thing. Google's official website for getting help and training developers web.dev. Available from: <https://web.dev/fast/#optimize-your-images> [Accessed 09 October 2022].
6. Utkina A. Development of information technologies in 2022. Available from: <https://tproger.ru/articles/tendencii-razvitija-it-2022> [Accessed 09 October 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Федосеева Софья Николаевна**, магистр кафедры информационных систем и технологий, инженер кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – информационные технологии, инновационный и проектный менеджмент.

**Майоров Евгений Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – информационные технологии и физическая оптика, приборостроение.

**Fedoseeva Sofya N.**, Master at the Department of Information Systems and Technologies, Engineer at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – information technology, innovation and project management.

**Mayorov Evgeny E.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – information technology, physical optics, instrument engineering.

Поступила в редакцию 27.10.2022

Поступила после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Received 27.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 30.01.2023

## Модели биохимического окисления органических веществ в сточных водах сульфат-целлюлозного предприятия

Мария Сергеевна Строганова<sup>1</sup>

masha199407@list.ru, orcid.org/0000-0002-0982-2356

Наталья Александровна Жильникова<sup>2</sup>

✉ nataliazhilnikova@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1291-7150

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Приведен аналитический обзор теорий и методов расчета параметров биохимического окисления органических веществ в водной среде. Предложен новый подход к оценке параметров трехкомпонентной модели биохимического окисления органических веществ, разработанной на основе рассмотренной методологии.

**Ключевые слова:** математические модели, скорость окисления, биохимическое окисление органических веществ, сульфат-целлюлозное предприятие

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-35-90128.

**Для цитирования:** Строганова М. С., Жильникова Н. А. Модели биохимического окисления органических веществ в сточных водах сульфат-целлюлозного предприятия // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 94–99. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-94-99.

Original article

## Models of biochemical oxidation of organic substances in wastewater of sulfate-pulp plant

Mariia S. Stroganova<sup>1</sup>

masha199407@list.ru, orcid.org/0000-0002-0982-2356

Natalia A. Zhilnikova<sup>2</sup>

✉ nataliazhilnikova@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1291-7150

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The analytical review of theories and methods for calculating parameters of biochemical oxidation of organic substances in an aquatic system are considered in the article. A new approach to the estimation of three-component model parameters of biochemical oxidation of organic substances developed based on the considered approaches is proposed.

**Keywords:** mathematical models, oxidation rate, biochemical oxidation of organic substances, sulfate-pulp plant

**Acknowledgements.** The reported study was funded by Russian Fond of Fundamental Research, project no. 19-35-90128.

**For citation:** Stroganova M. S., Zhilnikova N. A. Models of biochemical oxidation of organic substances in wastewater of sulfate-pulp plant. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1):94–99. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-94-99.

### Введение

На сегодняшний день существует ряд подходов к оценке параметров окисления органических веществ в сточных водах предприятий. В составе сточных вод предприятий, относящихся к целлюлозно-бумажной промышленности, в том числе и предприятий сульфат-целлюлозного производства, определяется большое

количество трудноокисляемых и легкоокисляемых органических соединений, которые подвергаются окислению уже на этапе биологической очистки под действием организмов активного ила и подаваемого из аэраторов растворенного кислорода и продолжают окисляться сапрофитными микроорганизмами при сбросе в водный объект с учетом кислородного и температурного режимов водной экосистемы.

## Модели биохимического окисления органических веществ

Н. W. Streeter и Е. В. Phelps изучили скорость, с которой растворенный кислород потребляется на биохимические процессы в воде. Скорость биохимического окисления органического вещества может быть описана мономолекулярной химической реакцией, которая пропорциональна оставшейся концентрации неокисленного органического вещества и является функцией температуры [1]. Ученые рассматривали показатель, который отражает легкоокисляемую фракцию органического вещества, выраженный в биохимическом потреблении кислорода (БПК).

По схеме Стритера – Фелпса изменение показателей БПК и  $O_2$  во времени описывается системой уравнений (1) при введении коэффициентов минерализации ( $k_1$ ) и реаэрации ( $k_2$ ):

$$\begin{aligned} \frac{dc_{\text{БПК}}}{dt} &= -k_1 C_{\text{БПК}}, \\ \frac{dc_{O_2}}{dt} &= \frac{dc_{\text{БПК}}}{dt} + k_2(C_{O_2\text{пр}} - C_{\text{БПК}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C_{\text{БПК}}$  – концентрация легкоокисляемых органических соединений по БПК;  $C_{O_2}$  – концентрация растворенного в воде кислорода;  $C_{O_2\text{пр}}$  – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре;  $k_1$  – коэффициент биохимического окисления;  $k_2$  – коэффициент реаэрации;  $t$  – время.

Из уравнения (1) коэффициент  $k_1$  можно представить в виде (2):

$$k_1 = \frac{1}{t} \ln \frac{c_0}{c_t}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – исходная концентрация неконсервативного вещества;  $C_t$  – концентрация этого вещества по истечении времени  $t$  – периода между измерениями концентрации вещества.

Ученые Н. А. Базякина и Э. Д. Терью пытались передать ход потребления кислорода уравнением мономолекулярной реакций, при котором скорость процесса окисления в каждый момент времени пропорциональна концентрации реагирующего вещества (3) [2, 3]:

$$\frac{dx}{dt} = K(a - x), \quad (3)$$

где  $a$  – начальная концентрация реагирующего вещества;  $x$  – количество прореагировавшего вещества;  $K$  – константа.

Так как концентрация реагирующего вещества убывает, то непрерывно убывает и скорость,

но константа сохраняет постоянное значение. В первом интервале времени скорость потребления кислорода почти постоянна, затем она резко уменьшается, после чего на некоторое время вновь устанавливается на новом постоянном уровне. Мономолекулярная реакция применима только для природной воды водных объектов.

Согласно подходу, предложенному Thomas R. Camp, две кривые биохимического окисления и потребности в кислороде идентичны только тогда, когда не учитывается процесс осаждения органического вещества в донные отложения [4]. Должна быть учтена скорость биохимического окисления органических веществ из донных отложений на первой стадии окисления.

Скорость изменения кислородного дефицита с течением времени вниз по течению, которая определяет форму кривой прогиба кислорода, выглядит следующим образом (4):

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= 2,3(-k_2 D + k_1 L) - a, \\ \frac{dL}{dt} &= -2,3(k_1 + k_3)L + p, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $D$  – дефицит кислорода;  $L$  – потребность в кислороде на первой стадии;  $t$  – время потока в днях;  $k_2$  – коэффициент реаэрации;  $k_1$  – коэффициент биохимического окисления;  $a$  – образование кислорода в сутки;  $p$  – скорость прироста величины БПК из донных отложений;  $k_3$  – коэффициент скорости оседания легкоокисляемого органического вещества в донных отложениях по БПК.

Профессором А. И. Шишкиным предложен подход, при котором исследовалась применимость моно- или бимолекулярной модели для конкретного типа стоков с разной степенью очистки [5]. Автор отметил, что при большом дефиците кислорода, в условиях анаэробного режима, кривая кислородного прогиба, полученная по уравнениям Стритера – Фелпса, дает отрицательное значение растворенного кислорода в воде, что является неправдоподобным для окружающей среды.

В связи с этим предложена схема процесса, при которой скорость изменения показателя БПК пропорциональна не только значению БПК, но и концентрации растворенного кислорода.

Мономолекулярная модель записывается в виде (5):

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\text{БПК}}}{dt} &= -k_1 C_{\text{БПК}}^0, \\ \frac{dC_{O_2}}{dt} &= -k_1 C_{\text{БПК}}^0 + k_2(C_{O_2\text{пр}} - C_{O_2}), \end{aligned} \quad (5)$$



где  $C_{\text{БПК}}$  – концентрация органических соединений по БПК;  $C_{\text{O}_2}$  – концентрация растворенного в воде кислорода;  $C_{\text{O}_2\text{пр}}$  – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре;  $k_1$  – коэффициент биохимического окисления;  $k_2$  – коэффициент реаэрации;  $t$  – время.

Бимолекулярная модель записывается в виде (6):

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\text{БПК}}}{dt} &= -\alpha C_{\text{БПК}} C_{\text{O}_2}, \\ \frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} &= -\alpha C_{\text{БПК}} C_{\text{O}_2} + \beta (C_{\text{O}_2\text{пр}} - C_{\text{O}_2}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной модели в зависимости от температуры, характеристик веществ, концентрации кислорода;  $\beta$  – коэффициент реаэрации по бимолекулярной модели.

А. В. Готовцев также отметил существенный недостаток схемы Стритера – Фелпса, который объяснил отсутствием взаимосвязи между скоростью окисления органического вещества и концентрацией растворенного кислорода. При использовании предложенных формул (1) концентрация кислорода становится отрицательной величиной, что является некорректным. Ученым предложена модифицированная система Стритера – Фелпса, которая отличается от классической системы третьим уравнением линейной зависимости между коэффициентом скорости окисления  $k_1$  и концентрацией растворенного кислорода (7) [6]:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -k_1 L, \\ \frac{dc}{dt} &= -k_1 L + k_2 (c_s - c), \\ k_1 &= k_0 \frac{c}{c_s}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $L$  – концентрация растворенного органического вещества;  $C_s$  – концентрация кислорода при 100 %-м насыщении;  $C$  – текущая концентрация кислорода;  $k_0$  – константа скорости биохимического окисления;  $k_2$  – константа скорости реаэрации.

Третье уравнение данной модифицированной системы отражает гипотезу, состоящую в том, что  $k_1$  – это не константа, а величина, пропорциональная безразмерной концентрации растворенного кислорода.

По результатам обзора представленных выше моделей и подходов к оценке процессов окисления и трансформации веществ в водной среде,

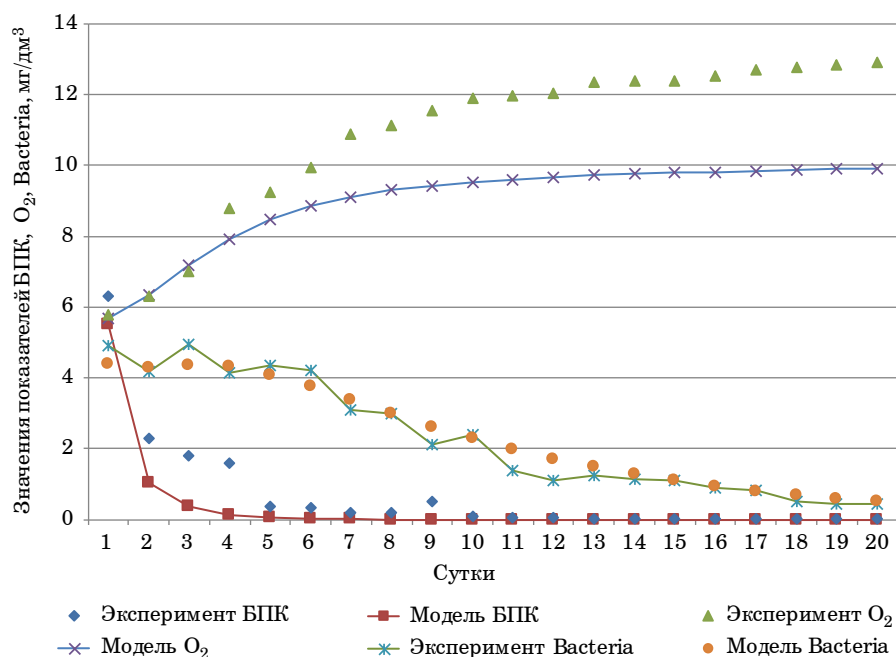
разработана трехкомпонентная модель биохимического окисления органического вещества и формирования качества водного объекта, представленная системой уравнений (8) [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\text{ОВ}}}{dt} &= -\alpha C_{\text{ОВ}} C_{\text{O}_2} C_B^n, \\ \frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} &= -\alpha C_{\text{ОВ}} C_{\text{O}_2} C_B^n + \beta (C_{\text{O}_2\text{пр}} - C_{\text{O}_2}), \\ \frac{dC_B}{dt} &= -\alpha C_{\text{ОВ}} C_{\text{O}_2} C_B^n + \beta (C_{\text{O}_2\text{пр}} - C_{\text{O}_2}) - \gamma C_B, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $C_{\text{ОВ}}$  – концентрация органического вещества, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{O}_2}$  – концентрация растворенного в воде кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_B$  – концентрация микроорганизмов, участвующих в процессе биохимического окисления, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{O}_2\text{пр}}$  – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре, мг/дм<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сутки<sup>-1</sup>;  $\beta$  – коэффициент реаэрации для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сутки<sup>-1</sup>;  $\gamma$  – коэффициент учета микроорганизмов в ходе процессов окисления, определяется экспериментальным путем, сутки<sup>-1</sup>;  $n$  – коэффициент согласования размерности (дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>/(мг)<sup>2</sup>, принятый за 1.

На основе полученного массива экспериментальных данных очищенной сточной воды сульфат-целлюлозного предприятия и природной воды исследуемого водного объекта рассчитан коэффициент учета микроорганизмов  $\gamma$ , определяющий скорость окисления органических веществ, специфичных для сульфат-целлюлозного производства. Значения коэффициента  $\gamma$  для БПК<sub>полн</sub> составило 0,45 суток<sup>-1</sup>, для метанола – 0,53 суток<sup>-1</sup>, для лигнина сульфатного – 0,03 суток<sup>-1</sup>, что показывает прямую зависимость природных свойств самого вещества от скорости окисления неконсервативного вещества и может являться параметром для многопараметральной конвективно-диффузионной модели трансформации загрязняющего вещества [7].

В ходе научной работы проведена верификация предложенной трехкомпонентной модели с целью сравнения натуральных данных, полученных в ходе эксперимента, и рассчитанных модельных данных, полученных в ходе решения модели с использованием программы MathCAD15. С целью оценки изменения показателей БПК, растворенного кислорода и микроорганизмов в течение 20 суток построены графики по полученным экспериментальным и расчетным данным. Тенденция изменения показателей сохраняется в обоих случаях (рисунок) [7].



- Изменение экспериментальных и модельных значений БПК, O<sub>2</sub> и микроорганизмов в зависимости от времени
- Changes in experimental and model values of BOD, O<sub>2</sub> and microorganisms depending on time

Данный численный метод может быть использован для прогноза качества воды при воздействии предприятия на водный объект, сточные воды которого содержат органические соединения. При этом в расчет необходимо включить ряд природных и антропогенных факторов и характеристик исследуемого водного объекта и эколого-технологических параметров основного производства и очистных сооружений предприятия.

## Заключение

На основе трехкомпонентной модели разработана методика нормирования сбросов сточных вод с учетом самоочищающей способности водного объекта, которая может быть применена при расчете качественных и количественных параметров сброса сточных вод. Методика позволяет уточнить расчет нормативов допустимого сброса (НДС) органических веществ при применении

коэффициента учета микроорганизмов и оптимизировать экологические издержки при проведении природоохранной деятельности предприятия [8]. Определено, что учет микроорганизмов в ходе процессов окисления органических веществ в расчете эколого-технологических параметров сброса позволяет снизить значение сверхнормативного сброса для показателей БПК<sub>полн</sub>, лигнина сульфатного, метанола до 95 % [8].

Полученные результаты применены для разработки комплексного экологического разрешения (КЭР) для объектов 1-й категории негативного воздействия на окружающую среду, к которым и относится рассматриваемый тип предприятий [8]. Предложенный научно-методический аппарат может быть использован для обоснования нормативов допустимого сброса органических веществ, а также разработки проектов НДС и КЭР предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, деревообрабатывающих предприятий и др.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Streeter H. W., Phelps E. B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. U. S. Publ. Health Service Bull, 1925. P. 1–75.
2. Базякина Н. А. Расчет константы скорости потребления кислорода при определении БПК сточной жидкости // Санитарная техника. 1933. № 2. С. 17–24.
3. Терью Э. Д. Скорость потребления кислорода в загрязненных водах // Вопросы загрязнения и самоочищения водоемов / пер. с англ. М.: Гос. центр. науч.-иссл. ин-т коммун. санитарии и гигиены, 1937. 160 с.

4. *Camp T. K. Water and it is impurities.* Boston, Massachusetts, 1963. 355 p.
5. *Замараева В. С.* Теоретические основы защиты окружающей среды. Изучение процессов переноса и трансформации веществ в водной среде на основе моделей конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 68 с.
6. *Готовцев А. В.* Модификация системы Стритера – Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией растворенного кислорода и скоростью окисления органического вещества // *Водные ресурсы.* 2010. Т. 37, № 2. С. 250–256.
7. *Строганова М. С.* Трехкомпонентная модель биохимического окисления органических веществ сточных вод ЦБП в зонах начального и основного разбавления // *Вестн. СПбГУПТД. Сер. 1: Естеств. и техн. науки.* 2021. № 2. С. 61–65.
8. *Строганова М. С., Жильникова Н. А.* Методика оценки самоочищающей способности водоема при влиянии стоков сульфат-целлюлозного производства // *Деревообрабатывающая пром-ть.* 2022. № 1. С. 89–101.

## REFERENCES

1. Streeter H. W., Phelps E. B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. U. S. Publ. Health Service Bull; 1925, pp. 1–75.
2. Bazyakina N. A. Calculation of the oxygen consumption rate constant in determining the BOD of the waste liquid. Sanitary engineering. 1933;(2):17–24. (In Russ.).
3. Teryo E. D. The rate of oxygen consumption in polluted waters. Issues of pollution and self-purification of reservoirs / translated from English. Moscow: State Center. scientific-research in-t communes. Sanitation and hygiene; 1937. 160 p. (In Russ.).
4. Camp T. K. Water and it is impurity. Boston, Massachusetts; 1963. 355 p.
5. Zamaraeva V. S. Theoretical foundations of environmental protection. Study of the processes of transfer and transformation of substances in the aquatic environment based on models of convective-diffusion transfer and transformation of substances. SPb.: Publishing House of Polytechnic University; 2007. 68 p. (In Russ.).
6. Gotovtsev A. V. Modification of the Streeter-Phelps system in order to take into account the feedback between the concentration of dissolved oxygen and the rate of organic matter oxidation. Water resources. 2010;37(2):250–256. (In Russ.).
7. Stroganova M. S. A three-component model of biochemical oxidation of organic substances of wastewater of the PPI in the zones of initial and basic dilution. Bulletin of SPbSUPTD. Series 1: Natural and technical sciences. 2021;(2):61–65. (In Russ.).
8. Stroganova M. S., Zhilnikova N. A. Methodology for assessing the self-cleaning ability of a reservoir under the influence of sulfate-pulp production effluents. Woodworking industry. 2022;(1):89–101. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Строганова Мария Сергеевна**, кандидат технических наук, начальник управления международных связей Высшей школы технологии и энергетики, ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

Область научных интересов – мониторинг водных экосистем, экологический мониторинг, трансграничные водные объекты, математическое моделирование процессов трансформации и окисления веществ.

**Жильникова Наталья Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

**Stroganova Mariia S.**, PhD in Technical Sciences, Head at the Department of International Relations of Higher School of Tecnology and Energy, Assistant at the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

Research interests – monitoring of aquatic ecosystems, environmental monitoring, transboundary water bodies, mathematical modeling of processes of transformation and oxidation of substances.

**Zhilnikova Natalia A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Область научных интересов – эколого-технологическое нормирование, инновационные технологии и эколого-экономическая оценка безопасности в природно-технических системах, методы обеспечения экологической безопасности производства.

Поступила в редакцию 29.11.2022

Поступила после рецензирования 20.12.2022

Принята к публикации 30.01.2023

Research interests – environmental and technological regulation, innovative technologies and environmental and economic assessment of safety in natural and technical systems, methods for ensuring environmental safety of production.

Received 29.11.2022

Revised 20.12.2022

Accepted 30.01.2023

## Технологии искусственного интеллекта для проверки и корректировки нормативной и технической документации

Юлия Анатольевна Антохина<sup>1</sup>

antoxina.j@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-9438-3062

Владимир Валентинович Окрепилов<sup>1</sup>

okrepilov@test-spb.ru, orcid.org/0000-0003-0830-2081

Елена Александровна Фролова<sup>1</sup>

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

Анна Сергеевна Степашкина<sup>1</sup>

✉ stepashkina.anna@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-3326-0776

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Подготовка технической и нормативной документации является важным элементом производственного процесса. Целью работы является создание критериев качества разрабатываемой технической и нормативной дисциплины, особое внимание уделяется проверке соответствия содержания документов не только по форме, но и по содержанию. Приведены критерии результативности процесса разработки технической и нормативной документации, предложен способ повышения качества документации, приведены модели, позволяющие автоматизировать процесс ее проверки на соответствие содержательной части. В качестве инструмента используются методы обработки естественного языка и машинного обучения. Проблему качества документации можно решить при внедрении специализированных автоматизированных интеллектуальных систем, позволяющих не только генерировать соответствующие шаблоны для технической и нормативной документации, но и проверять внутреннее содержание документов.

**Ключевые слова:** техническая документация, нормативная документация, оценка качества, методика поверки, измерения

**Для цитирования:** Антохина Ю. А., Окрепилов В. В., Фролова Е. А., Степашкина А. С. Технологии искусственного интеллекта для проверки и корректировки нормативной и технической документации // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 1. С. 100–107. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-100-107.

Original article

## Artificial intelligence technologies for checking and correcting regulatory and technical documentation

Yulia A. Antokhina<sup>1</sup>

antoxina.j@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-9438-3062

Vladimir V. Okrepilov<sup>1</sup>

okrepilov@test-spb.ru, orcid.org/0000-0003-0830-2081

Elena A. Frolova<sup>1</sup>

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

Anna S. Stepashkina<sup>1</sup>

✉ stepashkina.anna@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-3326-0776

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Preparation of technical and regulatory documentation is an important element of the production process. The purpose of the work is to design quality criteria for the developed technical and regulatory discipline, special attention is paid to checking the compliance of the document not only in form but also in content. The paper presents the criteria for the effectiveness of the developing process of technical and regulatory documentation. The method for improving the quality of documentation is proposed, models are given. It allows to automate the process of checking documentation for compliance with the content. As a tool natural language processing and machine learning methods are used. The problem of documentation quality can be solved by introducing specialized automated intelligent systems that allow not only generating appropriate templates for technical and regulatory documentation but also checking the internal content of documents.

**Keywords:** technical documentation, normative documentation, quality assessment, verification technique, measurements

**For citation:** Antokhina Yu. A., Okrepilov V. V., Frolova E. A., Stepashkina A. S. Artificial intelligence technologies for checking and correcting regulatory and technical documentation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(1): 100–107. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-100-107.

## Введение

Ежегодно предприятия, научно-исследовательские организации выпускают большие объемы технической и нормативной документации – приказы, методики проведения испытаний, методики калибровки и поверки средств измерения и др.

Проверкой составления документации занимаются юридические подразделения и различные технические отделы. Изначально любые документы необходимо проверить по содержанию, затем утвердить юридически. Самым простым этапом проверки документации является установление соответствия по форме, разделам. Более сложной задачей является проверка именно содержательной части. Подготовка проектов нормативной и технической документации может происходить на нескольких уровнях, в различных подразделениях предприятий. Несомненно, через одно подразделение может проходить колоссальное количество документов. Таким образом, речь идет и о больших объемах. Упростить работу по проверке качества содержания могут методы обработки естественного языка и машинного обучения.

В работе приведены примеры контроля содержания технической и нормативной документации предприятий на примере методики измерения и внутреннего локального акта.

При разработке методик испытания на предприятиях используются утвержденные шаблоны, которые необходимо корректно заполнить. Зачастую в них содержится информация об измерительном средстве, условиях проведения, средствах индивидуальной защиты, присутствуют протоколы проведения испытаний или требования к ведению журнала испытаний. При проверке методик могут встречаться технические ошибки (опечатки), грубые содержательные ошибки (отсутствие необходимого раздела документа).

Аналогичная проблема, несомненно, существует и при формировании локальных актов, приказов и прочей нормативной документации предприятия. Избежать стилистических и содержательных ошибок, ускорить время формирования документов, решить вопрос повышения качества содержательной части документации можно путем введения специализированных интеллектуальных цифровых систем – методов машинного обучения и обработки естественного языка.

Для комплексного решения поставленной задачи необходимо также выделить ключевые показатели качества разрабатываемой документации, а также разработать жесткие критерии и рекомендации по исключению ошибок на каждой стадии [1].

## Ключевые показатели качества и критерии результативности разработки нормативной и технической документации

Разберем сначала основные проблемы и возникающие вопросы, связанные с технической документацией.

При оценке качества технической документации на предприятиях значительное внимание необходимо уделить целому ряду показателей. Так, например, при разработке методики испытания необходимо учитывать специфику работы со средствами измерения, основные положения Закона об обеспечении единства измерений [2], особенности ведения отчетной документации (протоколов, журналов). Многие технологические предприятия имеют собственные базы технической документации, а также выгружают документацию в Федеральную государственную информационную систему (ФГИС) «Аршин» [3]. Существуют ситуации, когда в базу был ошибочно выгружен некорректный, устаревший документ, что может повлечь за собой последующие ошибки при проведении самого испытания.

Выделим ключевые показатели качества при реализации проверки корректности технической документации:

- соответствие документа его содержанию (общая смысловая нагрузка);
- соответствие структуры документа требованиям предприятия;
- наличие ссылок на нормативные документы – как предприятия, так и государственные;
- наличие необходимых характеристик программного обеспечения и оборудования;
- сроки действия документации;
- время проверки документа.

Требования к современным системам менеджмента качества промышленных предприятий включают в себя оценку результативности процессов, реализуемых при организации технологических процесса. Разработка технической документации является одним из важнейших процессов, от которого напрямую зависит целый ряд технологических процессов.

Немаловажную роль играют нормативные документы, разрабатываемые для организации рабочего процесса на предприятиях. В крупных организациях на утверждение и проверку корректности уходит значительное время, связано это с большим документооборотом. Автоматизация проверки позволит значительно ускорить процесс. Ключевые показатели качества создаваемой нормативной документации в большинстве своем дублируют показатели качества для технической документации. Опциональным является пункт,

- Таблица 1. Показатели результативности
- Table 1. Performance indicators

Показатель результативности	Критерий	
	не требуются улучшения, корректирующие/предупреждающие действия	требуются предупреждающие/корректирующие действия
ПР1. В техническом и нормативном документе присутствуют все структурные элементы, регламентированные предприятием и действующим законодательством на территории Российской Федерации	Да	Нет
ПР2. Указаны корректные ссылки на актуальную нормативную документацию	Да	Нет
ПР3. Содержательная часть документа соответствует смыслу	Да	Нет
ПР4*. Приведены необходимые характеристики программного обеспечения и оборудования	Да	Нет
ПР5. Время проверки технического документа	Менее 30 с	Более 30 с

Примечание: \* – показатель ПР4 является опциональным и необходим чаще для технической, чем для нормативной документации.

связанный с наличием информации о характеристиках программного обеспечения и технических характеристиках оборудования.

Для оценки качества технической и нормативной документации и повышения результативности процесса ее разработки сформулированы критерии, приведенные в табл. 1.

Осуществить проверку показателя результативности ПР2 можно с помощью простого программного кода, сверяющего наименование и актуальность документов с базой нормативных документов организации и Российской Федерации.

Оценивать показатели результативности ПР1, ПР3 и ПР4 в работе предлагается с использованием интеллектуальных технологий, а именно – алгоритмов обработки естественного языка и машинного обучения.

### Методы машинного обучения для проверки технической и нормативной документации

Методы машинного обучения широко используются при решении различных технических и бизнес-задач, таких как создание рекомендательных систем, анализ и обработка изображений, анализ больших данных и др. На основании методов обработки естественного языка и машинного обучения с учителем нами предложен метод, позволяющий проверять корректность текстовой информации. Принцип работы основан на использовании инструментов машинного

обучения с учителем, т. е. изначально подготавливается программный продукт, заранее обученный, знающий структуру и содержание каждого раздела документа.

Метод включает в себя следующие этапы:

- 1) подготовка обучающей выборки по тематике;
- 2) подготовка модели, программного кода, обучение модели;
- 3) преобразование текстовой информации в тензор для модели машинного обучения;
- 4) применение метода машинного обучения;
- 5) оценка качества результата;
- 6) апробирование на реальных данных.

### Принцип работы алгоритмов

Для создания автоматизированной системы проверки разработки технической документации предлагается выделить необходимые разделы. Техническая документация имеет четкую структуру, прописанную в нормативной документации. Рассмотрим на примере методики испытаний. Методика испытаний представляет собой перечень и описание способов и приемов, используемых при проведении испытаний и обработке их результатов, с указанием всех характеристик и параметров.

Обязательными пунктами в документации методики испытаний являются:

- 1) оцениваемые характеристики продукции;
- 2) способы анализа, оценки и обработки результатов испытаний;

- 3) порядок и условия проведения испытаний;
- 4) используемые приборы для контроля, измерения и проведения испытания;
- 5) отчетность.

Каждый пункт обладает определенной смысловой нагрузкой. Предварительно подготавливается датасет, в котором на каждый раздел методики испытания приводятся примеры из уже существующих аналогичных документов. Далее происходит обучение модели, после ее обучения возможно загружать разрабатываемые документы, на выходе получать классификацию текста по пунктам документа с указанием вероятности корректности составления текста [1].

Разберем принцип работы обученной модели. На вход подается текстовый файл, текст разбивается алгоритмом на абзацы, производится анализ каждого абзаца в отдельности. Они преобразуются в некоторый числовой массив с помощью методов обработки естественного языка и алгоритмов машинного обучения, а именно – классификации, оценивается соответствие каждой строки наименованию дисциплины. Затем программа выдает результат по каждому абзацу: класс и степень того, насколько корректно составлен текст в целом, относящийся к классу, и отдельно каждый абзац.

При решении такой задачи особое внимание необходимо уделить выборке данных, на которых будет проводиться обучение, и выбору оптимального метода машинного обучения. Подготовка обучающей выборки для проверки корректности подготовленной методики испытаний занимает

значительное время: из авторитетных изданий [4–6] и ФГИС «Аршин» [3] составляется таблица из двух столбцов:

- 1) «Text», в котором хранится текстовая информация;
- 2) «Class», в котором хранится информация о том, к какому классу принадлежит текст.

Пример выборки приведен в табл. 2 для пяти строк. В каждой строке столбца «Text» находится не более двух-трех предложений, относящихся к разделу «Методики испытаний». Помимо информации, соответствующей методике испытаний, датасет содержит разделы для других типов документов.

При создании обучающей выборки внимание стоит уделить количеству символов в строке: для быстрой работы будущего кода значение символов не должно превышать 512. Слишком длинные абзацы отбрасываются или разбиваются на меньшие.

Изначально наши данные представляют собой текст, который не понятен машине. Для этого выполним перевод привычного нам языка в машинный. После такой процедуры можно воспользоваться моделями машинного обучения. Таким образом, речь идет о последовательной работе с двумя моделями, причем данные от одной модели к другой передаются в виде векторов (матрицы) некоторой размерности.

Современные задачи обработки естественного языка, трансформации текста в вектор, достаточно хорошо решаются с помощью библиотеки

- Таблица 2. Обучающая выборка (датасет) для данных «Методика испытаний»
- Table 2. Training sample (dataset) for the data «Test Method»

Text	Class
Безотказность работы устройства	Оцениваемые характеристики продукции (методика испытаний)
Определение полноты и качеств реализации функций	Оцениваемые характеристики продукции (методика испытаний). Способы анализа, оценки и обработки результатов испытаний (методика испытаний)
Разработка теории, методов и средств измерений и контроля	Способы анализа, оценки и обработки результатов испытаний (методика испытаний)
Линии электропитания должны быть проверены на нормы электро- и пожарной безопасности	Порядок и условия проведения испытаний (методика испытаний)
Проверка комплектности и внешнего вида устройства	Порядок и условия проведения испытаний (методика испытаний)
Микрометр	Используемые приборы для контроля, измерения и проведения испытания (методика испытаний)
Термопара	Используемые приборы для контроля, измерения и проведения испытания (методика испытаний)
Протокол	Отчетность (методика испытаний)
Приборная погрешность составляет	Отчетность (методика испытаний)



PyTorch-Transformers [7] – библиотеки современных предварительно обученных моделей. Модели позволяют подготовить немеченные текстовые данные для дальнейшего построения моделей машинного обучения. Механизм изучает контекстные отношения между словами в тексте. Transformer включает в себя два отдельных механизма – энкодер, который считывает вводимый текст, и декодер, который производит прогноз для задачи.

В настоящее время модель BERT является одной из передовых и лежит в основе поисковой системы «Google». Вскоре после выпуска документа с описанием модели команда также открыла исходный код модели и сделала доступными для загрузки версии модели, которые уже были предварительно обучены на массивных наборах данных.

BERT – это модель, которая побила несколько рекордов в решении задач, связанных с обработкой естественного языка; это предобученный стек Transformer Encoder. Существуют две основные модели BERT разных размеров – BERTBase и BERTHuge. Оба размера модели BERT имеют большое количество слоев кодировщика.

BERT принимает в качестве входных данных последовательность слов (предложение). На выходе предложение принимает вид числового массива. Этот вектор и используют в качестве входных данных для выбранной модели машинного обучения – регрессии, классификации и пр.

Классический алгоритм BERT требует больших вычислительных ресурсов, объемов данных, производительности компьютера, за счет чего запустить готовое решение на любом устройстве может быть затруднительно. Классический BERT служит хорошей отправной точкой для модернизации кода. Его производные – RoBERTa, который может улучшать производительность, и DistilBERT, увеличивающий скорость вывода результата, – показали хорошие результаты в разных областях [8, 9]. Рассмотрим каждую вариацию подробнее.

DistilBERT – это уменьшенная версия BERT с открытым исходным кодом, более легкая и быстрая версия BERT, которая примерно соответствует ее характеристикам. Алгоритм основан на аппроксимации большой нейронной сети меньшей. В основе функции оптимизации лежит дивергенция Кульбака – Лейбера [9]. DistilBERT позволяет уменьшить размер модели BERT на 40 %, сохранив при этом 97 % результативности. DistilBERT способна понимать естественный язык на 60 % быстрее. Таким образом, DistilBERT позволяет увеличить скорость с некоторой потерей в качестве результата, незначительной в ряде задач.

При создании другой модели – RoBERTa – разработчики уделили особое внимание метрикам прогнозирования, за счет чего модель может давать высокую точность [8]. Подход RoBERTa представляет собой переработку BERT с улучшенной методикой обучения, позволяет обработать больше данных и имеет большую вычислительную мощность. Модель отличается от классической BERT динамическим маскированием.

Для выбора оптимального метода трансформации естественного языка в машинный случайным образом выбирали 400 строк из обучающих данных, затем применили три модификации алгоритма BERT (BERTBase, DistilBERT, RoBERTa). Полученные матрицы обрабатывали алгоритмом логистической регрессии LogisticRegression и оценивали точность модели метрикой Score, а также с помощью кросс-валидационной выборки. Результаты приведены в табл. 3.

Алгоритм DistilBERT действительно значительно быстрее, чем классический BERT, однако теряет в точности, но незначительно. RoBERTa обладает ожидаемой высокой точностью, но скорость работы и необходимые ресурсы велики.

Остановимся на алгоритме DistilBERT. На обучающей выборке производили обучение стека моделей обработки естественного языка DistilBERT и машинного обучения – логистическая регрессия.

На проверку одного документа уходит не более 30 с [10, 11]. Стоит отметить, что алгоритму типа BERT требуются большие предварительные датасеты для обучения, это удобно для проверки типовых документов, а именно – технической документации, однако совсем другая картина представляется при создании нормативной документации.

Проверка нормативной документации осуществляется по аналогичному принципу. Каждый документ должен содержать определенные блоки. Создаются датасеты с типовым заполнением блоков. Количество блоков может быть неограниченно.

• Таблица 3. Алгоритмы обработки естественного языка

• Table 3. Natural language processing algorithms

Алгоритм	Время обучения модели	Оценка кросс-валидации (n=5) по метрике «accuracy»
BERTBase	4 min 46 sec	array ([0,822, 0,733, 0,711, 0,711, 0,8])
DistilBERT	2 min 6 sec	array ([0,689, 0,733, 0,844, 0,733, 0,8])
RoBERTa	6 min 36 sec	array ([0,844, 0,822, 0,778, 0,822, 0,8])

ным. В текущей задаче рассматривалось 27 классов. В случае отсутствия данных по классу информация выводиться не будет.

Для проверки нормативной документации система должна быть менее чувствительна к объему данных (не всегда возможно создать датасеты для обучения большого размера), скорости работы. Поэтому для проверки нормативных актов алгоритм был адаптирован и создан на основании стека «мешка слов» и алгоритма классификации перцептрон. Точность работы алгоритма по метрике «ассигасу» составляет 97 % при количестве признаков в классе не более 200, когда как BERT требует минимум 1000.

## Заключение

В работе сформулированы ключевые показатели качества и результативности разрабатываемой технической и нормативной документации. Предложен метод автоматизированной проверки показателей качества, связанных с содержательной частью документации – соответствием содержания документа смысловой нагрузке. В основе метода лежат алгоритмы обработки естественного языка DistilBERT и машинного обучения LogisticRegression для технической документации, алгоритмы «мешка слов» и перцептрон – для нормативной документации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Okrepilov V. V., Stepashkina A. S. Predictive modeling for improving the quality of educational and methodological documentation // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. ICEST – III. 2022. Doi: 10.15405/epsbs.2022.08.13.
2. Федеральный закон от 26.06.2008 (ред. 11.06.2021) № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=398044&ysclid=ld8oo4wwsz110488185> (дата обращения: 09.12.2022).
3. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений ФГИС «АРШИН». Официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 20.12.2022).
4. Основы цифровой метрологии: учебник / Ю. А. Антохина [и др.]; под ред. д-ра экон. наук, проф., акад. РАН В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2022. 405 с.
5. Цифровая метрология: учеб. пособие / Ю. А. Антохина [и др.]; под ред. д-ра экон. наук, проф., акад. РАН В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2021. 181 с.
6. Бавыкин О. Б. Метрология. М.: Форум. 2019. 522 с.
7. Attention Is All You Need / A. Vaswani [et al.] // Computation and Language. Machine Learning. 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf> (дата обращения: 20.12.2022).
8. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach / Y. Liu [et al.] // Computation and Language. Machine Learning. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1907.11692.pdf> (дата обращения: 20.12.2022).
9. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf Th. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter // Computation and Language. Machine Learning. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.01108> (дата обращения: 20.12.2022).
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 20226415528. Российская Федерация. Модель для распознавания текстов нормативно-правовых актов / Ю. А. Антохина, И. А. Воропаев, С. В. Солёный, А. С. Степашкина, Е. А. Фролов, Е. А. Фролова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; заявл. 31.03.2022.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022615527. Российская Федерация. Кросс-платформенный обработчик серийных данных в формате docxtocsv / Ю. А. Антохина, И. А. Воропаев, С. В. Солёный, А. С. Степашкина, Е. А. Фролов, Е. А. Фролова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; заявл. 31.03.2022.

## REFERENCES

1. Okrepilov V. V., Stepashkina A. S. Predictive modeling for improving the quality of educational and methodological documentation. European Proceedings of Social and Behavioral Sciences. ICEST – III. 2022. Doi: 10.15405/epsbs.2022.08.13.

2. Federal Law of 26.06.2008 (rev. 11.06.2021) no. 102-FZ «On Ensuring the Uniformity of Measurements». Available from: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=398044&ysclid=ld8oo4wwsz110488185> [Accessed 09 December 2022].
3. Federal information fund to ensure the uniformity of measurements FSIS «ARSHIN». Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> [Accessed 20 December 2022].
4. Antokhina Yu. A., Okrepilov V. V., Ovodenko A. A. et al. Fundamentals of digital metrology: textbook; eds by Dr. Econ. Sciences, Prof., Academician at the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. SPb.: SUAI; 2022. 405 p. (In Russ.).
5. Antokhina Yu. A., Okrepilov V. V., Frolova E. A. et al. Digital metrology: textbook. allowance; eds by Dr. Econ. Sciences, Prof., Academician at the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. SPb.: SUAI; 2021. 181 p. (In Russ.).
6. Bavykin O. B. Metrology. Moscow: Forum; 2019. 522 p. (In Russ.).
7. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al. Attention Is All You Need. Computation and Language. Machine learning. 2017. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf> [Accessed 20 December 2022].
8. Liu Y., Ott M., Goyal N. et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. Computation and Language. Machine learning. 2019. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1907.11692.pdf> [Accessed 20 December 2022].
9. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf Th. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. Computation and Language. Machine learning. 2020. Available from: <https://arxiv.org/abs/1910.01108> [Accessed 20 December 2022].
10. Certificate of registration of the computer program no. 20226415528. Russian Federation. Model for recognition of texts of normative legal acts / Yu. A. Antokhina, I. A. Voropaev, S. V. Solyonij, A. S. Stepashkina, E.A. Frolov, E. A. Frolova; applicant Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; declared 31.03.2022. (In Russ.).
11. Computer program registration certificate no. 2022615527. Russian Federation. Cross-platform serial data processor in docxtocsv format / Yu. A. Antokhina, I. A. Voropaev, S. V. Solyonij, A. S. Stepashkina, E. A. Frolov, E. A. Frolova; applicant Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; declared 31.03.2022. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Антохина Юлия Анатольевна**, доктор экономических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – ситуационное управление качеством проектов технического университета.

**Окрепилов Владимир Валентинович**, доктор экономических наук, профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой метрологического обеспечения и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, президент Метрологической академии, основатель научного направления «Экономика качества».

Область научных интересов – теория, методология и методы экономических и социальных проблем качества, организационно-экономические условия обеспечения качества и конкурентоспособности.

**Фролова Елена Александровна**, доктор технических наук, доцент, директор института фундаментальной подготовки и технологических инноваций Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы управления качеством сложных технических систем.

**Степашкина Анна Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологического обеспе-

**Antokhina Julia A.**, D. Sc. in Economics, Full Professor, Rector, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – situational quality management of technical university projects.

**Okrepilov Vladimir V.**, D. Sc. in Economics, Full Professor, Academician at the Russian Academy of Sciences, Head at the Department of Metrological Support and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; President at the Metrological Academy; Founder of the Scientific Direction «Economics of Quality».

Research interests – theory, methodology and methods of economic and social problems of quality, organizational and economic conditions for ensuring quality and competitiveness.

**Frolova Elena A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Director at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovation, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of quality management of complex technical systems.

**Stepashkina Anna S.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Metrological

чения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, технологии искусственного интеллекта.

Поступила в редакцию 19.01.2023

Поступила после рецензирования 22.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023

Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical modeling, artificial intelligent technologies.

Received 19.01.2023

Revised 22.01.2023

Accepted 30.01.2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАДИОТЕХНИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

<b>Антохин Е. А., Дворников С. В., Бестугин А. Р., Киршина И. А., Дворников С. С.</b> Сравнительный анализ сигналов, используемых в многоканальных системах радиосвязи .....	6
<b>Виноградов А. Ю., Суворова Е. А., Сыщиков А. Ю.</b> Методы оценки и устранения узких мест, снижающих пропускную способность мостов SpaceFibre-Ethernet .....	15
<b>Чупринова О. В., Степашкина А. С.</b> Архитектура базы данных для автоматизированных измерений.....	25
<b>Оленев В. Л.</b> Проблемы проектирования коммуникационных протоколов нового поколения .....	29
<b>Советов Б. Я., Татарникова Т. М.</b> Контроллер нечеткой логики для размещения данных в многоуровневом хранилище .....	37
<b>Викулов А. С., Парамонов А. И.</b> Формализация требований к характеристикам сети IEEE 802.11 на основе предварительного обследования.....	43
<b>Ваттимена Г. М., Исаков В. И., Шепета Д. А.</b> Нелинейный формирующий фильтр для имитации флуктуаций локационных сигналов, отраженных от береговой линии.....	54
<b>Беззатеев С. В., Афанасьева А. В., Супрун А. Ф.</b> Атаки на обучающие выборки в системах машинного обучения и защита от них .....	61

### КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

<b>Антохина Ю. А., Кричевский М. Л., Оводенко А. А.</b> Искусственный интеллект в управлении инновациями.....	72
<b>Солёный С. В., Создателева М. Э., Рысин А. В.</b> Исследование особенностей применения аддитивных технологий в производственных процессах .....	80

## CONTENTS

### RADIO ENGINEERING, INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES AND COMMUNICATION SYSTEMS

<b>Antokhin E. A., Dvornikov S. V., Bestugin A. R., Kirshina I. A., Dvornikov S. S.</b> Comparative analysis of signals used in multichannel radio communication systems .....	6
<b>Vinogradov A. Yu., Suvorova E. A., Syschikov A. Yu.</b> Methods for detecting and eliminating bottlenecks that reduce the bandwidth of SpaceFibre-Ethernet bridges.....	15
<b>Chuprinova O. V., Stepashkina A. S.</b> Database architecture for automated measurements.....	25
<b>Olenev V. L.</b> Problems of new generation communication protocols design.....	29
<b>Sovetov B. Ya., Tatarnikova T. M.</b> Fuzzy logic controller for placing data in multi-level storage .....	37
<b>Vikulov A. S., Paramonov A. I.</b> Determination of IEEE 802.11 network coverage requirements based on preliminary site-survey.....	43
<b>Wattimena G. M., Isakov V. I., Shepeta D. A.</b> The nonlinier forming filter for simulating fluctuations of location signals reflected from the shoreline .....	54
<b>Bezdateev S. V., Afanasyeva A. V., Suprun A. F.</b> Attacks on data sets in machine learning systems and protection against them.....	61

### CYBERPHYSICAL SYSTEMS AND DIGITAL TRANSFORMATION

<b>Antokhina Yu. A., Krichevsky M. L., Ovodenko A. A.</b> Artificial intelligence in innovation management .....	72
<b>Solyonyj S. V., Sozdateleva M. E., Rysin A. V.</b> Research of the specific application of additive technologies in production processes .....	80

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

<b>Федосеева С. Н., Майоров Е. Е.</b> Оптимизация графических изображений в системе Adobe Photoshop.....	85
<b>Строганова М. С., Жильникова Н. А.</b> Модели биохимического окисления органических веществ в сточных водах сульфат-целлюлозного предприятия.....	94
<b>Антохина Ю. А., Окрепилов В. В., Фролова Е. А., Степашкина А. С.</b> Технологии искусственного интеллекта для проверки и корректировки нормативной и технической документации.....	100

FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED  
RESEARCH

<b>Fedoseeva S. N., Mayorov E. E.</b> Optimization of graphic images in the system Adobe Photoshop .....	85
<b>Stroganova M. S., Zhilnikova N. A.</b> Models of biochemical oxidation of organic substances in wastewater of sulfate-pulp plant .....	94
<b>Antokhina Yu. A., Okrepilov V. V., Frolova E. A., Stepashkina A. S.</b> Artificial intelligence technologies for checking and correcting regulatory and technical documentation .....	100

## Требования к порядку представления рукописей для публикации в научном журнале «Инновационное приборостроение»

1. Для публикации в журнале принимаются оригинальные научные материалы, не публиковавшиеся ранее и соответствующие тематической направленности журнала и критериям научного качества, представляющие интерес для научного сообщества. Авторы представляют в редакцию бумажную и электронную версии статьи в формате Microsoft Word (файл «Структура статьи и образец ее оформления» находится на сайте: <https://fs.guar.ru/inps/obr.pdf>). Заключение пишется в повествовательном стиле, не разбивается на пункты. Выводы должны быть лаконичными и точными, состоять из нескольких пронумерованных пунктов. Обычно количество пунктов соответствует количеству поставленных задач.

2. Объем статьи не должен быть менее 12 000 знаков с пробелами (7–8 машинописных страниц) и не должен превышать 40 000 знаков с пробелами (22–23 машинописные страницы).

Распечатка статьи должна быть подписана всеми авторами с указанием даты ее отправки.

3. К рукописи статьи должны прилагаться две рецензии (внутренняя и внешняя), заключения экспертной комиссии и комиссии экспортного контроля, отчет о проверке на наличие заимствований (процент оригинальности статьи должен составлять не менее 80).

4. При оформлении статьи необходимо придерживаться следующей структуры информации, представленной **на русском и английском языках**:

– фамилия, имя и отчество автора(-ов) полностью; ученая степень, ученое звание, почетное звание (если имеются); должность, название учреждения(-ий), в котором выполнена работа; город, где находится учреждение(-ия), страна. Если рукопись подается от нескольких учреждений, их следует пронумеровать надстрочно и так же пронумеровать авторов статьи. Необходимо указать телефоны, адреса электронной почты, ORCID авторов (при наличии); одного из авторов следует указать в качестве ответственного за переписку;

– индекс УДК. Помещают в начале статьи на отдельной строке слева;

– заглавие статьи;

– аннотация / Abstract. Объем ограничен 250 словами, использование ссылок и аббревиатур не допускается;

– ключевые слова / Keywords. У статьи может быть от 3 до 15 ключевых слов. Термины-словосочетания считаются одним ключевым словом.

5. В конце статьи размещается список источников / References на русском и английском языках. Список источников и ссылки на них оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографические записи в перечне нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. References оформляют согласно стилю Vancouver (файл «Основные правила оформления References в стиле Vancouver» расположен на сайте: <https://fs.guar.ru/inps/vancouver.pdf>).

### **Краткие технические требования к оформлению статьи**

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и список источников) не должен превышать 22–23 страниц машинописного текста формата А4, набранных на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 14, поля не менее 2 см.

Простые **формулы** следует набирать в Word, сложные – с помощью редактора MathType или Equation. В десятичных дробях ставятся запятые. Для набора одной формулы не используйте два редактора одновременно. При наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой. Номер формулы (если он есть) набирается в тексте справа от формулы в скобках, не в формульном редакторе, не в таблице. Нумеруются те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. При нумерации формул рекомендуется пользоваться десятичной системой.

При наборе формулы используйте только настройки по умолчанию; никогда не пользуйтесь вкладкой Size, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = – ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что латинские набираются светлым курсивом, русские и греческие – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

### **Иллюстрации:**

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, они должны быть выполнены в векторных программах: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Adobe Illustrator (\*.ai); Coreldraw (\*.cdr, версия не выше 15); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фотографии и скриншоты – в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Графические материалы (рисунки, схемы, иллюстрации) должны иметь последовательные порядковые номера, подписанные на русском и английском языках (Рис. 1 / Fig. 1), обязательные ссылки в тексте. Условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном тексте статьи или подрисуночной подписи.

**Таблицы** должны иметь последовательные порядковые номера, названия на русском и английском языках (Таблица 1 / Table 1), ссылки в тексте. Для всех показателей в таблице необходимо указать единицы измерений по СИ, ГОСТ 8.417-2002.

Полный перечень технических требований расположен на сайте: [https://fs.guar.ru/inps/tech\\_tr.pdf](https://fs.guar.ru/inps/tech_tr.pdf).

**Рукописи, не соответствующие указанным требованиям,  
не рассматриваются**

**Автор несет полную ответственность за точность и достоверность данных, приведенных в рукописи статьи,  
присылаемой в редакцию журнала**