



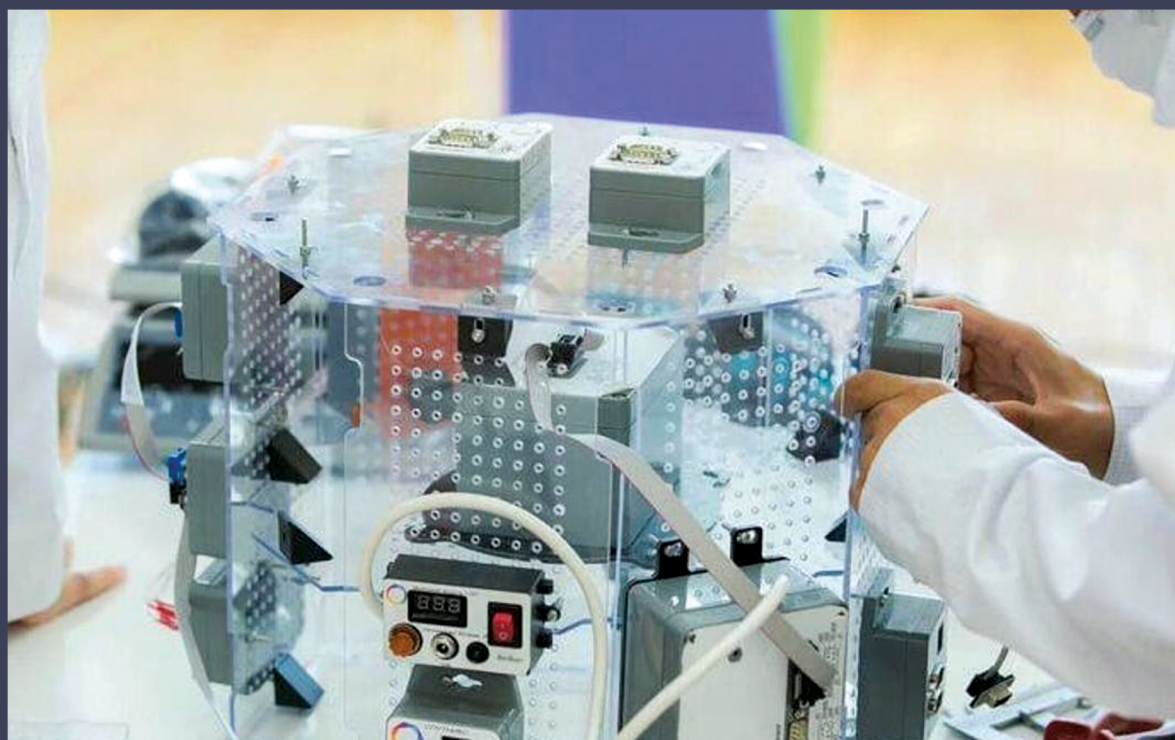
ISSN 2949-0693

# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 2 • 2023

INNOVATIVE INSTRUMENTATION





**ГУАП**

Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
аэрокосмического  
приборостроения

# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 2 • 2023

# INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 2, no. 2 • 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 *N. A. Panshina*

Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 31.03.2023. Signed for printing: 05.04.2023. 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 *Н. А. Паньшина*  
Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 31.03.2023. Дата выхода в свет: 05.04.2023. Формат 60 × 84 1/8.  
Уч.-изд. л. 14,1. Усл. печ. л. 13,7. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 105.

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 СМИ, 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.

## Синтез антенных систем с квазипараболическими рефлекторами

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.** Представлен аналитический обзор о методе синтеза рефлекторов параболического типа с заданными параметрами. Приведены основные выражения, характеризующие взаимосвязь геометрических параметров параболоидов. Показана взаимосвязь электрических и геометрических параметров синтезируемых антенных систем. Приведены графические материалы, поясняющие сущность рассматриваемых физических явлений. Демонстрируются качественные отличия реальных антенных систем от синтезируемых аналитических моделей. Представлен пример компьютерного моделирования антенной системы с квазипараболическим рефлектором и продольным неточечным облучателем. Приведен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** параболические рефлекторы, синтез зеркальных антенн, электрические параметры антенн, геометрическая структура отражателей, пассивный рефлектор

**Для цитирования:** Оводенко А. А. Синтез антенных систем с квазипараболическими рефлекторами // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 5–10. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-5-10.

Original article

## Synthesis of antenna systems with quasi-parabolic reflectors

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.** An analytical review of the method for the synthesis of parabolic type reflectors with given parameters is presented. The main expressions characterizing the relationship of the geometric parameters of paraboloids are given. The relationship between the electrical and geometric parameters of the synthesized antenna systems is shown. Graphic materials explaining the essence of the considered physical phenomena are given. The qualitative differences between real antenna systems and synthesized analytical models are demonstrated. An example of computer simulation of an antenna system with a quasi-parabolic reflector and a longitudinal non-point feed is presented. An analysis of the obtained results is given.

**Keywords:** parabolic reflectors, synthesis of mirror antennas, electrical parameters of antennas, geometric structure of reflectors, passive reflector

**For citation:** Ovodenko A. A. Synthesis of antenna systems with quasi-parabolic reflectors. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):5–10. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-5-10.

### Введение

Успешность организации радиосвязи во многом зависит от эффективности применяемых антенных систем [1, 2], поскольку именно они обеспечивают не только основное усиление в радиолинии, но и позволяют минимизировать негативное воздействие помех преднамеренного и непреднамеренного характера [3, 4]. Именно поэтому теории синтеза антенных систем с требуемыми параметрами уделяют глубокое внимание [5].

При этом наибольший энергетический потенциал способны обеспечить антенны рефлекторного типа [6, 7], коэффициент усиления которых

достигает 30 дБ и выше для микроволновых и более высоких частот.

Методы синтеза рефлекторных антенн глубоко проработаны в теоретическом плане [1, 8], что открывает широкие возможности по их практическому применению. Однако сложность технической реализации, связанная с необходимостью соблюдения требований геометрической оптики, существенно затрудняет создание высокоэффективных антенных систем [9, 10].

В общем случае рефлекторы могут быть как активными, так и пассивными элементами антенной системы [1, 2]. При этом, учитывая, что они, как правило, находятся в ближней зоне основного излучателя, в ряде источников их рассматривают

с позиции теории связанных вибраторов, согласно которой на пассивных элементах рефлекторов возникает эффект наведения электромагнитного поля (ЭМП) [11]. Однако для высокочастотных систем все же правомерно использовать термин отражения ЭМП от рефлектора, что соответствует закону Снеллиуса и согласуется с концепцией лучевой природы ЭМП [12].

В данной статье представлены практические рекомендации выбора формы рефлектора для антенных систем, используемых в средствах оборонного назначения.

### Общие сведения о рефлекторах

Простейшая антенная система рефлекторного типа состоит всего из двух компонентов: отражающей поверхности рефлектора и облучающего элемента, расположенного в фокусе рефлектора [13, 14].

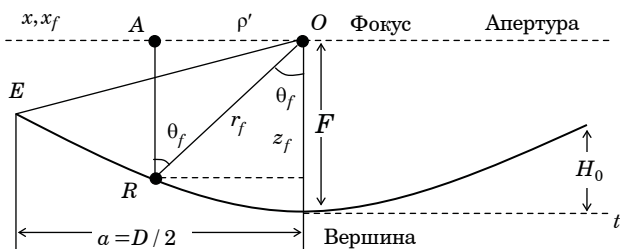
Более сложные конструкции содержат вторичный отражатель (субрефлектор), расположенный в фокусе, который подвержен излучению первичного облучателя. Такие системы называются двухрефлекторными антеннами [8].

На практике наибольшее распространение получили рефлекторные антенны с параболическим отражателем, при том что возможны и другие конструкции отражателей, в частности цилиндрические, угловые и сферические. На рис. 1 представлен параболический рефлектор с указанием его основных параметров.

В общем случае параболоид описывается следующим уравнением:

$$\rho'^2 = 4F(F - z_f), \quad \rho' \leq a. \quad (1)$$

Здесь  $\rho'$  – расстояние от точки  $A$  до фокальной точки  $O$ , где  $A$  – проекция точки  $R$  на поверхность отражателя на плоскость, ортогональную оси (плоскость апертуры) в фокальной точке. При заданном смещении  $\rho'$  от оси от-



• Рис. 1. Параболический рефлектор  
• Fig. 1. Parabolic reflector

ражателя точка  $R$  на поверхности отражателя находится на расстоянии  $r_f$  от фокальной точки  $O$ . Положение  $R$  может быть определено либо через координаты  $(\rho', z_f)$ , которые являются координатами в прямоугольной системе, либо через координаты  $(r_f, \theta_f)$ , которые являются полярными координатами.

Соотношение между  $(r_f, \theta_f)$  и фокусным расстоянием  $F$  можно найти из выражения (1):

$$z_f = \frac{2F}{1 + \cos \theta_f} = \frac{F}{\cos^2(\theta_f / 2)}. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает поверхность параболоида в полярных координатах.

Другими отношениями, которые обычно используют для описания характеристик рефлекторов, являются [15]:

$$\rho' = r_f \sin \theta_f = \frac{2F \sin \theta_f}{1 + \cos \theta_f} = 2F \tan(\theta_f / 2). \quad (3)$$

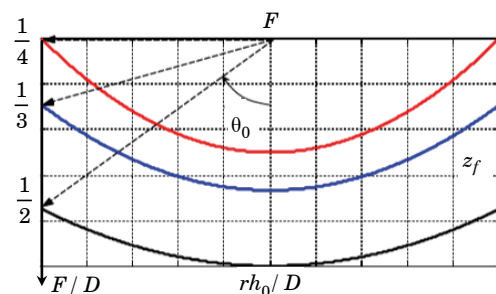
Осесимметричный (вращательно-симметричный) отражатель параболического типа полностью определяется соответствующей параболой, т. е. описывается двумя основными параметрами: диаметром  $D$  и фокусным расстоянием  $F$  (см. рис. 1).

В ряде литературы парабола указывается в терминах  $D$  и отношениях  $F/D$  [16]. В том случае, когда отношение  $F/D$  приближается к бесконечности, отражатель становится плоским.

На рис. 2 показаны различные параболические кривые, полученные при соотношении  $F/D = 0,25; 1/3; 0,5$ , построенные для условия, что точка фокуса  $F$  находится в плоскости, проходящей через обод отражателя.

Заметим, что угол от точки фокуса  $\theta_0$  до края отражателя связан с соотношением  $F/D$  как

$$\theta_0 = 2 \arctg \left[ \frac{1}{4(F/D)} \right]. \quad (4)$$



• Рис. 2. Виды параболических кривых  
• Fig. 2. Types of parabolic curves

Вместе с тем фокусное расстояние  $F$  такого отражателя может быть рассчитано после измерения его диаметра  $D$  и высоты  $H_0$  (см. рис. 1):

$$F = \frac{D^2}{16H_0}. \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть получено путем решения (1) при  $\rho' = D/2$  и  $z_f = F - H_0$ .

Например, если  $F/D = 1/4$ , то  $H_0 = D/4 \Rightarrow H_0 = F$ , т. е. фокальная точка находится на плоскости обода отражателя.

В общем случае задача проектирования отражателя направлена на согласование диаграммы направленности антенны с отражателем. Как правило, схема подачи должна быть примерно на уровне  $-10$  дБ в направлении обода, т. е.  $F_f(\theta = \theta_0) = -10$  дБ (0,316 от нормированного значения амплитуды).

Геометрическая структура отражателей параболического типа имеет две уникальные особенности. Во-первых, все лучи, выходящие из фокальной точки  $O$ , после отражения локализируются вдоль оси отражателя. А во-вторых, все общие длины пути луча (от фокальной точки до отражателя и далее до плоскости апертуры) имеют одинаковую длину, равную  $2F$ .

Однако следует заметить, что данные свойства сохраняются только при выполнении следующих условий [1, 11, 17]:

- радиус кривизны отражателя достаточно велик по сравнению с длиной волны, и локальная область вокруг каждой точки отражения может рассматриваться как плоская;

- радиус кривизны входящей волны от источника питания достаточно велик и может быть обработан локально в точке отражения как плоская волна;

- отражатель является идеальным проводником.

## Особенности синтеза параболических рефлекторов для реальных систем

На практике в ходе синтеза антенных систем дециметрового и сантиметрового диапазона волн особое внимание уделяют достижению высокого значения коэффициента направленного действия (КНД) [1]. С этой целью выбирают такие трехмерные поверхности рефлекторов, которые изначально обеспечивают возможность совмещения фазового центра возбудителя с фокусом синтезируемого рефлектора, в интересах последующего преобразования сферической волны, падающей на облучатель в множество синфазных лучей, образующих плоскую волну.

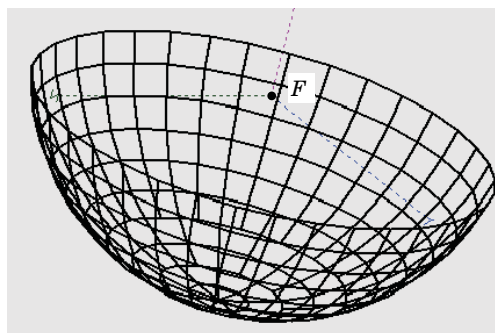
Следует отметить, что КНД во многом зависит от формы и размеров рефлектора. И с этих позиций оптимальной формой рефлектора является параболоид, обеспечивающий возможность формировать узкие диаграммы направленности (ДН) и достигать максимального значения КНД. Однако во многих источниках информации не акцентируется внимание на том, что для достижения высоких значений КНД необходимо, чтобы сам возбудитель был точечным и при этом обеспечивал высокостабильный фазовый центр, что недостижимо на практике.

Поэтому все практические рефлекторы являются квазипараболическими [1, 7]. Следовательно, именно квазипараболу изначально и следует моделировать для конкретных радиосистем.

В качестве примера рассмотрим синтез квазипараболического рефлектора для частоты 400 МГц при условии, что в качестве облучателя параболоида используется полуволновый вибратор, расположенный в фокусе на расстоянии 0,65 м от его вершины.

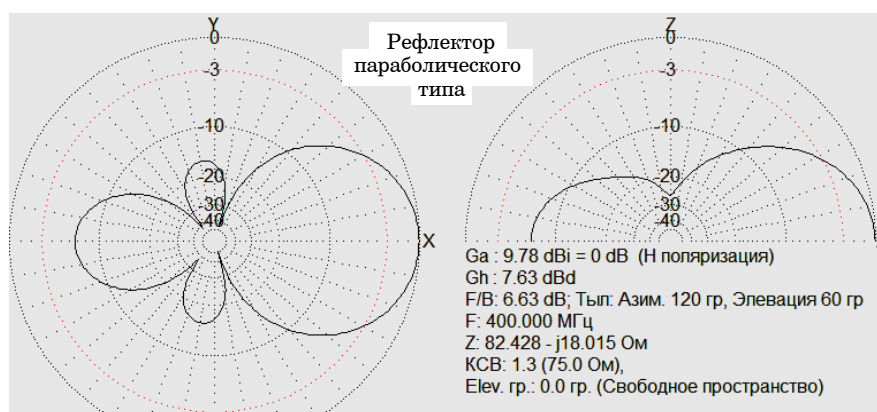
На рис. 3 представлена конструкция синтезируемого рефлектора, а на рис. 4 – его ДН, построенные в горизонтальной и вертикальной плоскостях, моделирование проведено в среде моделирования MMANA [18, 19].

Синтезируемый параболоид имеет относительно небольшие размеры. Так, диаметр зеркала достигает всего лишь 1 метра. При этом сам рефлектор не является сплошной зеркальной поверхностью, он выполнен из сетки, что позволило существенно снизить его массогабаритные показатели и уменьшить ветровую нагрузку. Поскольку размеры параболической антенной системы сопоставимы с рабочей длиной волны, а ее рефлектор выполнен не из сплошной металлической поверхности, то формируемая ДН имеет несколько высокий уровень боковых лепестков (до  $-18$  дБ). Но при этом такая антенна обеспечивает низкое значение коэффициента стоячей



• Рис. 3. Рефлектор параболического типа  
• Fig. 3. Parabolic-type reflector





- *Рис. 4. ДН рефлектора параболического типа в горизонтальной и вертикальной плоскостях*
- *Fig. 4. Directivity diagram of a parabolic reflector in the horizontal and vertical planes*

волны (КСВ), равное 1,3 для нагрузки в 75 Ом, что является весьма приемлемым показателем.

## Заключение

Таким образом, можно заключить, что моделирование, изначально предполагающее рефлектор в виде псевдопараболы, а также отказ от точечного излучателя хотя и снижают желаемые показатели, но все же позволяют синтезировать антенные системы с приемлемыми электрическими и

конструктивными параметрами. При этом следует понимать, что реальное КНД параболических антенн существенно зависит не столько от типа выбранного облучателя, сколько от точности выполнения параболической поверхности зеркала рефлектора.

Дальнейшее направление исследования будет связано с совместным применением методов пространственной селекции [19] и частотно-временной обработки сигналов, представленных в [20–22].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антенны / Н. П. Габеля, А. Д. Истрашкин, Ю. К. Муравьев, В. П. Серков; под ред. Ю. К. Муравьева. Л.: ВКАС, 1963. 629 с.
2. Антенно-фидерные устройства военных средств и комплексов радиосвязи: учебник / М. Р. Бибарсов, Р. Ю. Бородулин, С. А. Ульянов, А. М. Спиринов; под ред. В. И. Власенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 264 с.
3. Антенны с малой радиозаметностью: монография / В. Н. Красюк, А. А. Оводенко, А. Р. Бестугин, М. Б. Рыжиков; под ред. А. А. Оводенко. СПб.: Наука, 2011. 672 с.
4. Пименов В. Ф., Попов А. С. Исследование эффективности оптимальной пространственной селекции помех в линейной антенной решетке по критерию минимума среднеквадратического отклонения // Труды Военно-косм. акад. им. А. Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 77–83.
5. Журавлёв А. В., Маркин В. Г. Пространственная компенсация помех, направления прихода которых известны // Радиотехника. 2018. № 7. С. 105–108.
6. Савельев Д. О., Черенков О. А., Максименко Е. Г. Современные методы проектирования и анализа спутниковых рефлекторных антенн зарубежных КА // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XIV Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2022. С. 54–57.
7. Формирование управляемого рефлектора СВЧ-антенны на основе активного метаматериала / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Фёдоров, Е. А. Ищенко // Телекоммуникации. 2022. № 5. С. 2–7.
8. Дробкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974. 535 с.
9. Крячко А. Ф., Лихачев В. М., Оводенко А. А. Комплексная математика в задачах радиолокации: монография. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 467 с.
10. Подходы к вариации профиля излучающей раскрыва антенны вытекающей волны дифракционного типа для улучшения характеристик направленности / Д. Ю. Крюков, А. В. Останков, С. А. Антипов, К. А. Разинкин // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 7. С. 25–32.

11. *Власенко В. И., Дворников С. В., Крячко А. Ф.* Энергетические расчеты в электродинамике: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2020. 192 с.
12. *Фисанов В. В.* Формулировка законов Снеллиуса – Декарта в терминах геометрической алгебры // *Известия вузов. Физика.* 2019. Т. 62, № 5 (737). С. 54–58.
13. Численное моделирование трансформируемых космических рефлекторных антенн / С. В. Белов [и др.] // *Известия вузов. Физика.* 2012. Т. 55, № 9-3. С. 13–18.
14. *Крячко А. Ф., Лихачев В. М., Оводенко А. А.* Комплексная математика в задачах прикладной электродинамики: монография. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 268 с.
15. *Cheng D. K.* Effects of arbitrary phase errors on the gain and beamwidth characteristics of radiation pattern // *IRE Trans. AP.* 1995. Vol. AP-3, № 3. P. 145–147.
16. *Гончаренко И. В.* Антенны КВ и УКВ: монография. Ч. 1: Компьютерное моделирование MMANA. М.: РадиоСофт, Радио, 2004. 128 с.
17. *Шабунин А. В.* Селекция пространственных мод в ансамбле хаотических отображений с дальнедействующими связями // *Известия высш. учеб. завед. Приклад. нелинейная динамика.* 2022. Т. 30, № 1. С. 109–124.
18. *Андреев Г. И., Замарин М. Е., Малинка А. В.* Методология основ построения и требования к конструкции антенн летательных аппаратов, разработка широкополосной антенны с двойной поляризацией для применения в антенных решетках авиационной техники РЭБ // *Антенны.* 2022. № 3. С. 11–17.
19. *Романов П. В., Чони Ю. И.* Реконструкция профиля рефлектора спутниковой многолучевой гибридной зеркальной антенны путем обработки сигнала наземного маяка // *Антенны.* 2022. № 4. С. 5–17.
20. *Малеханов А. И., Смирнов А. В.* Моделирование пространственной когерентности многомодового сигнала и отклика горизонтальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // *Известия вузов. Радиофизика.* 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 46–65.
21. Анализ спектральной эффективности сигналов многоканальных РТС / М. А. Крячко, Е. В. Марков, Б. А. Аюков, А. Ф. Крячко, С. В. Дворников // *Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения.* 2021. № 1. С. 99–107.
22. *Банков С. Е.* Анализ антенных решеток щелевых и ленточных излучателей методом обобщенной матрицы рассеяния // *Радиотехника и электроника.* 2020. Т. 65, № 1. С. 31–49.

## REFERENCES

1. Gabelya N. P., Istrashkin A. D., Muravyov Yu. K., Serkov V. P. Antennas; eds. by Yu. K. Muravyov. Leningrad: VKAS; 1963. 629 p. (In Russ.).
2. Bibarsov M. R., Borodulin R. Yu., Ulyanov S. A., Spirin A. M. Antenna-feeder devices of military means and radio communication complexes: textbook; eds. by V. I. Vlasenko. SPb.: Publishing House of the Polytechnic University; 2016. 264 p. (In Russ.).
3. Krasnyuk V. N., Ovodenko A. A., Bestugin A. R., Ryzhikov M. B. Antennas with low radio sensitivity: monograph; eds by A. A. Ovodenko. SPb.: Nauka; 2011. 672 p. (In Russ.).
4. Pimenov V. F., Popov A. S. Investigation of the effectiveness of optimal spatial interference selection in a linear antenna array according to the criterion of minimum standard deviation. Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy. 2019;(666):77–83. (In Russ.).
5. Zhuravlev A. V., Markin V. G. Spatial compensation of noise, the directions of arrival of which are known. Radio engineering. 2018;(7):105–108. (In Russ.).
6. Saveliev D. O., Cherenkov O. A., Maksimenko E. G. Modern methods of design and analysis of satellite reflector antennas of foreign spacecraft. High technologies, science and education: topical issues, achievements and innovations: collection of articles of the XIV All-Russian scientific and practical conference. Penza; 2022, pp. 54–57. (In Russ.).
7. Pasternak Yu. G., Pandyurin V. A., Fedorov S. M., Ishchenko E. A. Formation of a controlled microwave antenna reflector based on an active metamaterial. Telecommunications. 2022;(5):2–7. (In Russ.).
8. Drabkin A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. Antenna-feeder devices. Moscow: Soviet radio; 1974. 535 p. (In Russ.).
9. Kryachko A. F., Likhachev V. M., Ovodenko A. A. Complex mathematics in the problems of radiolocation: monograph. SPb.: POLITEKH-PRESS; 2019. 467 p. (In Russ.).
10. Kryukov D. Yu., Ostankov A. V., Antipov S. A., Razinkin K. A. Approaches to variation of the profile of the radiating aperture of a leaky wave antenna of a diffractive type to improve the directivity characteristics. Radiotekhnika. 2022;86(7):25–32. (In Russ.).
11. Vlasenko V. I., Dvornikov S. V., Kryachko A. F. Energy calculations in electrodynamics: textbook. SPb.: Lan'; 2020. 192 p. (In Russ.).

12. Fisanov V. V. Formulation of the laws of Snell – Descartes in terms of geometric algebra. *Izvestiya vuzov. Physics.* 2019;62(737):54–58. (In Russ.).
13. Belov S. V., Belkov A. V., Evdokimov A. S. et al. Numerical modeling of transformable space reflector antennas. *Izv. Physics.* 2012;55(9-3):13–18. (In Russ.).
14. Kryachko A. F., Likhachev V. M., Ovodenko A. A. Complex mathematics in the problems of applied electrodynamics. SPb.: POLITEKH-PRESS; 2019. 268 p. (In Russ.).
15. Cheng D. K. Effects of arbitrary phase errors on the gain and beamwidth characteristics of radiation pattern. *IRE Trans. AP.* 1955;AP-3(3):145–147.
16. Goncharenko I. V. HF and VHF antennas. Part 1: Computer modeling of MMANA. Moscow: RadioSoft, Radio; 2004. 128 p. (In Russ.).
17. Shabunin A. V. Selection of spatial modes in an ensemble of chaotic mappings with long-range connections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Applied nonlinear dynamics.* 2022;30(1):109–124. (In Russ.).
18. Andreev G. I., Zamarin M. E., Malinka A. V. Construction methodology and requirements to aircraft antenna design, development of broadband antenna with dual polarization for use in antenna arrays of aviation REB technique. *Antennas.* 2022;(3):11–17. (In Russ.).
19. Romanov P. V., Choni Y. I. Reconstruction of the reflector profile of a satellite multibeam hybrid mirror antenna by processing the signal of a ground beacon. *Antennas.* 2022;(4):5–17. (In Russ.).
20. Malekhanov A. I., Smirnov A. V. Modeling of spatial coherence of the multi-mode signal and the horizontal antenna response in a random-heterogeneous ocean waveguide. *Izvestiya vuzov. Radiophysics.* 2022;65(1):46–65. (In Russ.).
21. Kryachko M. A., Markov E. V., Ayukov B. A., et al. Analysis of the spectral efficiency of the multi-channel RTS signals. *Voprosy radioelektroniki. Series: Television engineering.* 2021;(1):99–107. (In Russ.).
22. Bankov S. E. Analysis of antenna arrays of slot and ribbon radiators by the method of generalized scattering matrix. *Radiotekhnika i elektronika.* 2020;65(1):31–49. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**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.

**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 31.01.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 31.01.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

Научная статья  
УДК 004.896

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-11-19

## Исследование возможности повышения эффективности производственных процессов в приборостроении за счет использования коллаборативных роботов

Екатерина Александровна Смещук<sup>1</sup>

smeshuk.kate2604@gmail.com

Ярослав Алексеевич Щеников<sup>1</sup>

✉ yar2409@mail.ru

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

**Аннотация.** В данной работе исследуется возможность применения технологии совместной работы человека и робота в процессе производства радиоэлектронной продукции. Рассматриваются технологии распознавания движений человека-оператора для реализации совместной работы человека и робота при монтаже печатных плат в радиоэлектронном приборостроении с целью максимизации положительного синергетического эффекта от совместной работы человека и робота. Даны рекомендации по реализации инженерных решений на базе рассматриваемых в статье технологий.

**Ключевые слова:** человек, робот, совместная работа, эффективность, Индустрия 5.0

**Для цитирования:** Смещук Е. А., Щеников Я. А. Исследование возможности повышения эффективности производственных процессов в приборостроении за счет использования коллаборативных роботов // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 11–19. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-11-19.

Original article

## The research of production processes efficiency increasing possibility in instrumentation through the use of collaborative robots

Ekaterina A. Smeshchuk<sup>1</sup>

smeshuk.kate2604@gmail.com

Yaroslav A. Shchenikov<sup>1</sup>

✉ yar2409@mail.ru

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

**Abstract.** In this paper, the possibility of applying the human and robot collaboration technology in the production of electronic products is investigated. The technologies of recognition of human operator movements for the implementation of human and a robot collaboration during the printed circuit boards installation in electronic instrumentation in order to maximize the positive synergetic effect of human and a robot collaboration are considered. Recommendations on the implementation of engineering solutions based on the technologies considered in the article are given.

**Keywords:** man, kobot, collaboration, collaboration, efficiency, Industry 5.0

**For citation:** Smeshchuk E. A., Shchenikov Ya. A. The research of production processes efficiency increasing possibility in instrumentation through the use of collaborative robots. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):11–19. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-11-19.

### Введение

Современный рынок робототехники является зрелым, существующие на нем технологии изучаются и используются уже более 70 лет. По оценке Международной федерации робототехники *IFR*, к 2023 г. во всем мире количество внедренных роботов может достигнуть двух миллионов. В исследовании *Markets and Markets* утверждается, что в 2025 г. инвестиции компаний в приобретение промышленных роботов увеличатся более чем

в десять раз – с 373 млн до 12,3 млрд долларов, что вызвано необходимостью автоматизировать производственные процессы, а также растущим дефицитом рабочей силы на рынке труда.

Востребованность промышленных роботов в России растет, также растет и плотность робототехники – число используемых роботов на каждые 10 000 человек населения страны. По показателю плотности робототехники в настоящее время лидирует Южная Корея (700 роботов на 10 000 человек), в российских же компаниях

в 2020 г. общее число роботов составляло порядка 5000 [1, 2].

## Коллаборативные роботы и их применение в приборостроении

Робот, выполняющий совместно с человеком работу в одном замкнутом пространстве, называется коллаборативным роботом, или коботом [3]. Коботы, в отличие от классических промышленных роботов, легче программируются и оснащаются системами безопасности, позволяющими им работать в непосредственной близости от работника-человека.

Достоинствами коботов являются:

– *безопасность* – благодаря датчикам коботы могут работать в непосредственной близости от человека в отличие от промышленного робота, требующего защитного ограждения;

– *гибкость в обучении* – коботы могут обучаться через подражание действиям человека, получать рабочие инструкции через графический пользовательский интерфейс либо просто программироваться;

– *системность* – кобот ориентирован на совместную работу с человеком, реализуя единую систему, от которой разумно требовать положительного синергетического эффекта;

– *универсальность* – коботы подходят для реализации большинства операций в промышленности и не только;

– *экономичность* – коботы не требуют больших инвестиций, потребляют мало электроэнергии, не имеют серьезных требований к установке и эксплуатации.

Недостатки коботов:

– *относительно низкая скорость работы* – из-за необходимости учитывать наличие людей поблизости;

– *невысокая грузоподъемность* – коботы способны перемещать предметы весом не более 10 кг.

Коботы надежны и могут реализовывать многие производственные операции малой и средней сложности, используемые в приборостроении. Они могут быть легко перепрограммированы на выполнение другой операции, для чего зачастую не требуется специалист высокой квалификации и временных затрат более 30 минут. Скорость работы кобота зависит от конкретной операции, но она при прочих равных условиях обычно выше, чем у человека.

Коботы в приборостроении могут использоваться для повышения эффективности следующих операций:

1) *монтаж и сборка*: установка электронных компонентов, сборка электронных и механических узлов, сварочные работы;

2) *пред- и постобработка деталей и изделий*: снятие материала, нанесение лака, маркировка, финишная обработка;

3) *обслуживание станков*: активация оборудования для 3D-печати, загрузка деталей в станок с числовым программным управлением (ЧПУ), выемка готовых изделий;

4) *транспортировка*: перемещение деталей и материалов для обработки, сбор продукции с конвейера и ее дальнейшее распределение на последующие операции;

5) *контроль качества*: тестирование готовых устройств, контроль размеров с помощью калибра, кобот как контрольно-измерительная машина.

Применение коботов способно вывести современное приборостроительное производство на новый уровень, особенно при производстве радиоэлектронной аппаратуры небольшими партиями, когда использование сборочных линий и линий печатного монтажа нецелесообразно. Для этого следует поручать коботу те операции, которые он выполняет более точно, чем человек, а человеку – операции, с которыми кобот пока справиться не может. Внедрение коботов – один из способов решения проблемы острой нехватки рабочих кадров [4].

## От Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0

Некоторые технологии Индустрии 4.0 исключают или минимизируют присутствие человека на производстве с целью снижения влияния человеческого фактора на качество продукции. В противоположность этому, в Индустрии 5.0 все адаптировано к потребностям и разнообразию промышленных рабочих мест. Работник Индустрии 5.0 получит больше возможностей для реализации своего творческого потенциала, принимая непосредственное участие в разработке и внедрении систем искусственного интеллекта и робототехнических систем.

Подразумевается, что переход от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0 будет связан с переносом фокуса именно на потребности человека, даже если это будет тормозить технологический прогресс. Индустрия 5.0 основана на самообучении машин, копировании действий людей или других роботов и автоматической оптимизации производственных процессов.

Основные идеи, заложенные в Индустрии 5.0:

– смещение к новой парадигме, ставящей во главу человека, его комфорт, удобство, причем данный подход обеспечивает уважение прав ра-

ботника, соответствие квалификации работника выполняемой работе, безопасность труда;

– роль работника в любой отрасли меняется и становится более важной, работник рассматривается не как инструмент и источник для создания «ценности», а как возможность для инвестирования в компанию, которая может пользоваться тем, что организация и сотрудник прогрессируют одновременно, следовательно, предприятию выгодно вкладываться в развитие навыков, способностей, оно заинтересовано в улучшении благосостояния и благополучия работников;

– роботы не заменяют людей на производстве, лишая работы человека и ухудшая его социальный уровень жизни, а взаимодействуют с ним в процессе производства, улучшают качество продукции, что позволит оптимизировать расход времени и финансовые затраты на производство.

Одной из важных технологий Индустрии 5.0 является коллаборация (совместная работа) человека и робота. Использование роботов может облегчить трудовой процесс, так как такие роботы способны решать простые и рутинные задачи, что сделает трудовой процесс более безопасным для большинства сотрудников предприятия. Коллаборация людей с ограниченными возможностями и роботов может дать первым новые возможности – они смогут стать полноценной частью трудового коллектива.

Эффективность производственных процессов в приборостроении в рамках Индустрии 5.0 во многом будет связана с эффективностью коллаборации человека и робота. Подобная коллаборация представляет собой систему, для которой необходимо максимизировать положительный синергетический эффект, что достигается благодаря правильно выстроенным связям между элементами системы. Под такими связями подразумеваются каналы и способы передачи информации между людьми и роботами. Широкое внедрение технологий искусственно-

го интеллекта также дает надежды на повышение эффективности коллаборации киберфизической системы «человек – робот». Робот является безопасным для оператора-человека благодаря датчикам, но ему еще требуется уметь считывать движения оператора-человека для осуществления совместной производственной деятельности [5, 6].

## Повышение эффективности совместной работы человека и робота

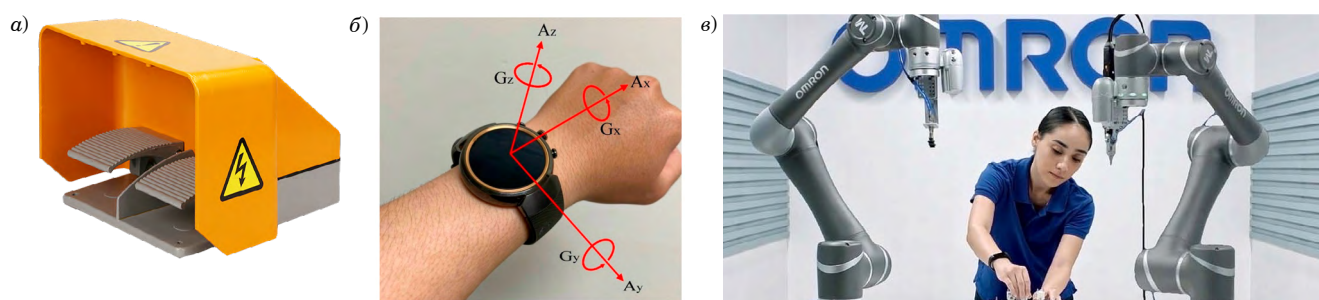
Обеспечение эффективной совместной работы робота и человека требует разработки технологий и инженерных решений, реализующих функции контроля и управления в таких киберфизических системах [7]. Наименее исследуемым элементом рассматриваемой киберфизической системы является технология съема информации о движениях человека-оператора.

Различными исследовательскими группами рассматриваются такие способы реализации подобного съема, как: с помощью педалей (рис. 1, а); с помощью акселерометров, укрепленных на руках человека (рис. 1, б); визуальный съем информации с помощью видеокамеры (рис. 1, в) [8–11].

### Съем информации с помощью педалей

Использование педалей является простейшим способом управления роботом. Промышленность выпускает широкий ассортимент как отдельных педалей, так и блоков педалей.

Достоинствами управления с помощью педалей являются простота, дешевизна, высокая ремонтпригодность такой системы. Недостатками подобной системы является ограниченный набор команд управления, определяющийся небольшим количеством степеней свободы, которое может обеспечить использование педалей.



• Рис. 1. Управление роботом с помощью: а – педалей; б – акселерометра; в – камеры  
 • Fig. 1. Controlling the robot using: а – pedals; б – the accelerometer; в – the camera

## Съем информации с помощью акселерометра

Относительно несложный и относительно недорогой способ управления роботом – съем информации о движении рук с помощью акселерометра или акселерометров, прикрепленных к рукам работника-человека. Любое действие работника вызывает заметный отклик сигнала акселерометра по всем трем координатам:  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Каждая операция имеет свой уникальный «образ» отклика, который может быть распознан программно-аппаратной системой.

Суммирование сигналов, поступающих с осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  акселерометра, позволяет в реальной системе использовать меньше проводных линий связей либо передавать сигнал от акселерометра в распознающее устройство посредством радиоканала, избавляясь, таким образом, от мешающих работе монтажника проводов.

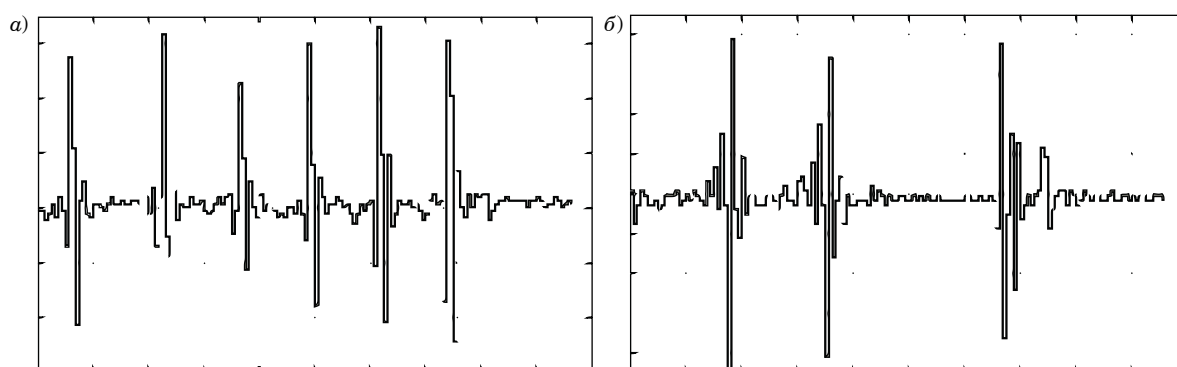
На рис. 2; 3 представлены снятые с акселерометра сигналы при движениях рукой оператора в процессе сборочно-монтажных работ в радиоэлектронном приборостроении, взяты базовые

движения при пайке печатной платы. На рис. 2 отражены формы сигнала при повороте руки влево и вправо, на рис. 3 – формы сигнала при подаче руки вперед и назад.

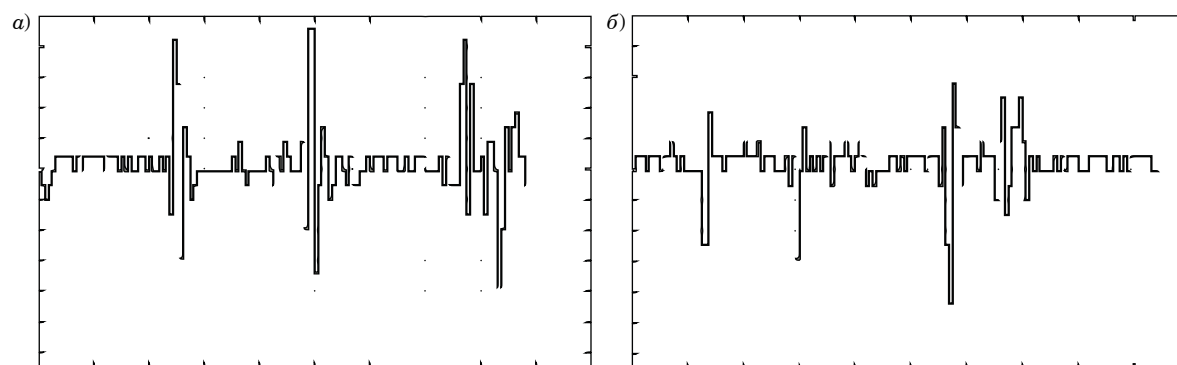
Схема проведения исследования представлена на рис. 4. Электрические сигналы с выходов  $X$  и  $Y$ , поступающие с акселерометра, подвергаются дискретизации и квантованию. В реальной системе эти операции реализуются встроенным в микроконтроллер аналого-цифровым преобразователем (АЦП), при моделировании – посредством виртуальных блоков, реализующих данную функцию.

В данном исследовании в качестве АЦП использовалась звуковая карта персонального компьютера. Далее посредством блока *From Wave Device* оцифрованные сигналы в режиме реального времени поступали в имитационную модель, реализованную в среде имитационного моделирования *Simulink* (рис. 5).

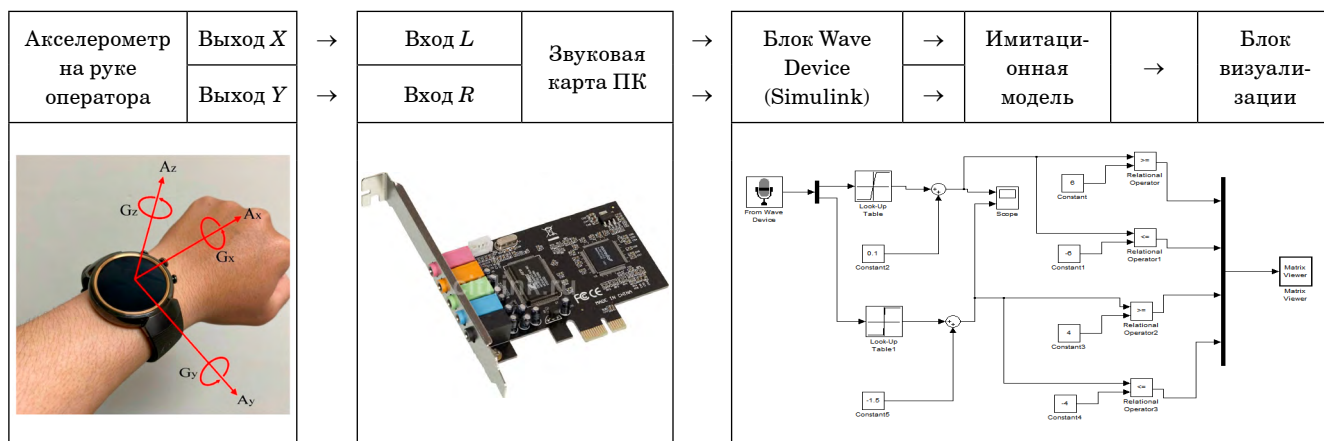
Блок *From Wave Device* получает данные из АЦП звуковой карты компьютера. Далее с помощью блока *Look-Up Table* производится их компрессия. Блоки вычисления суммы *Add* (сумма-



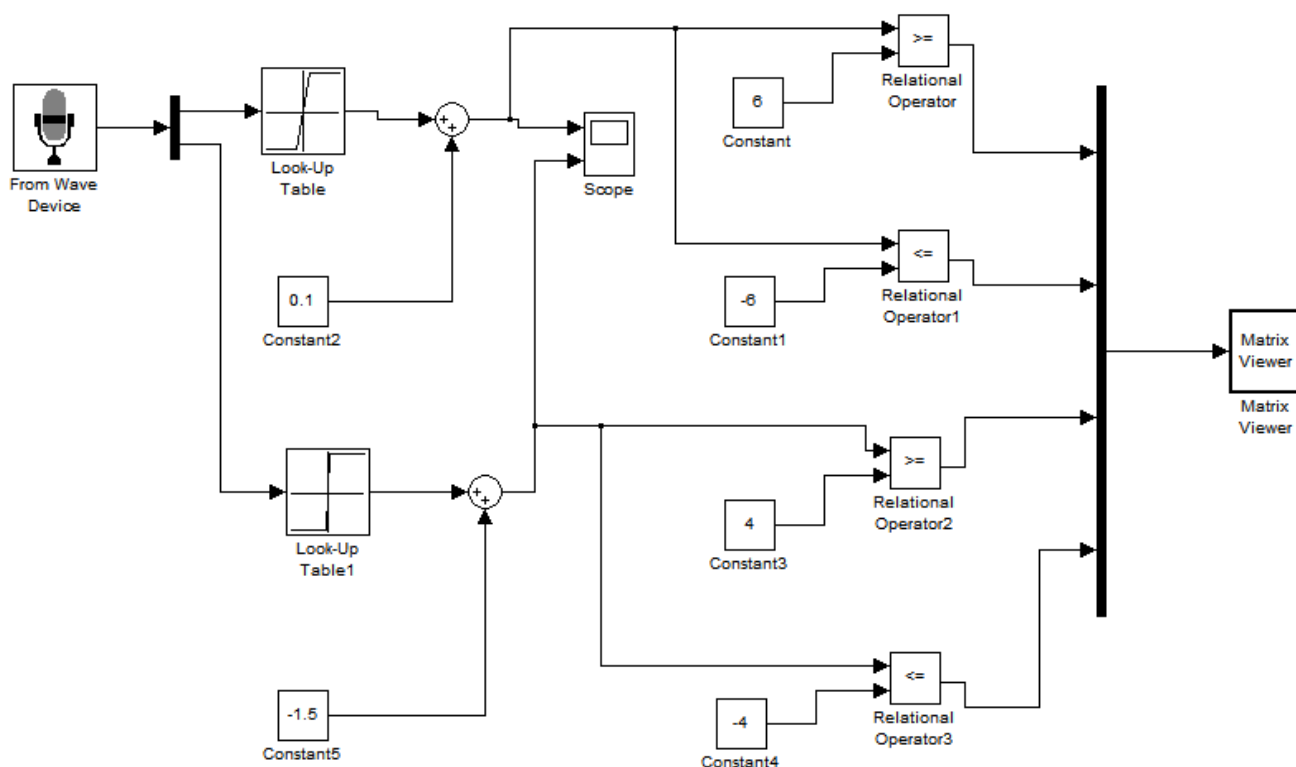
• Рис. 2. Формы сигнала при повороте руки: а – влево; б – вправо  
• Fig. 2. Waveforms when turning the hand: a – to the left; б – to the right



• Рис. 3. Формы сигнала при подаче руки: а – вперед; б – назад  
• Fig. 3. Waveforms when feeding the hand: a – forward; б – back



• Рис. 4. Схема проведения исследования  
 • Fig. 4. Research scheme

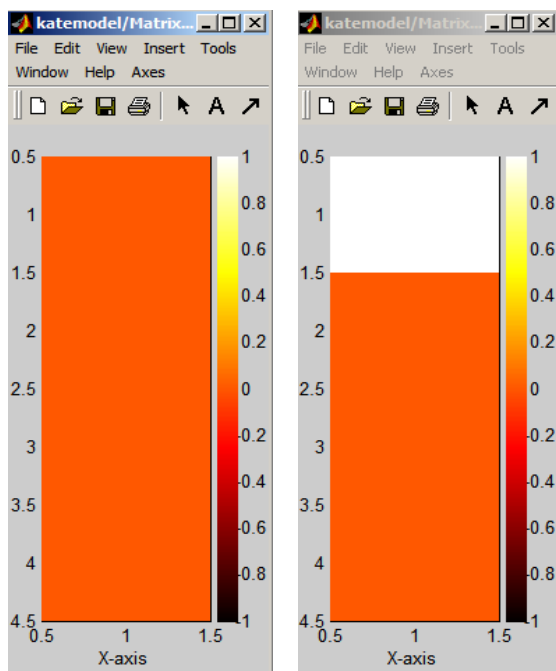


• Рис. 5. Имитационная модель, реализованная в Simulink  
 • Fig. 5. Simulation model implemented in Simulink

тор) совместно с блоками *Constant2* и *Constant5* позволяют задавать смещение сигнала относительно нуля. Осциллограф *Scope* используется для построения графиков, отображенных на рис. 2; 3, – изменение сигналов в процессе движений рукой в рамках эксперимента (сборка печатной платы оператором, у которого на ведущей руке прикреплен акселерометр). Блоки *Relational Operator* сравнивают значения входных сигна-

лов с пороговыми значениями, задаваемыми посредством блоков *Constant*, *Constant1*, *Constant3*, *Constant4*. При превышении порогового значения блока *Relational Operator* последний выдает логическую единицу, сигнализирующую об определенном движении, совершенном человеком-оператором. Мультиплексор *Mux* объединяет сигналы в вектор для дальнейшей визуализации с помощью блока *Matrix Viewer* (рис. 6).



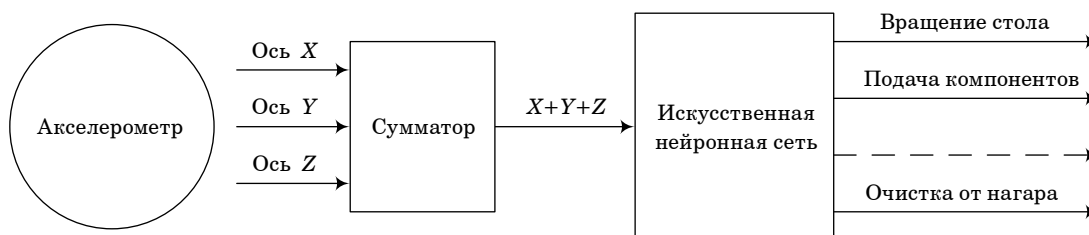


• *Рис. 6. Блок Matrix Viewer в режиме ожидания (слева), реакция на поворот руки влево (справа)*  
 • *Fig. 6. The Matrix Viewer block is in standby mode (left), reaction to the left hand turn (right)*

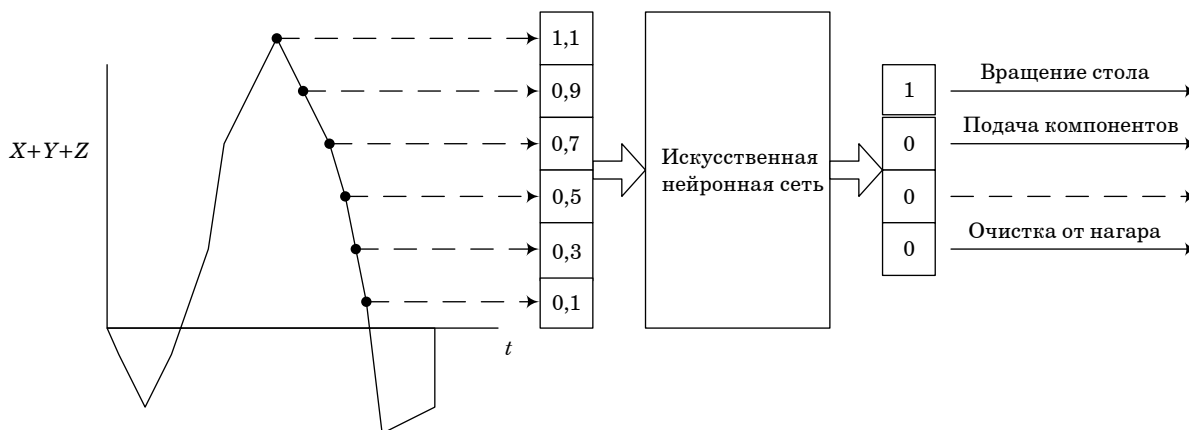
На рис. 7 приведена концептуальная модель реализации более сложной технологии обработки информации, снимаемой с помощью акселерометра. Введение сумматора, объединяющего сигналы с осях X, Y, Z акселерометра, позволяют в реальной системе либо использовать меньше проводных линий связей, либо передавать сигнал от акселерометра в распознающую искусственную нейронную сеть посредством радиоканала, реализуя беспроводную систему передачи данных, которая более удобна для работника из-за отсутствия проводов.

Электрический сигнал  $X+Y+Z$ , поступающий с акселерометра, подвергается дискретизации и квантованию. Далее из последовательности отсчетов сигнала  $X+Y+Z$  формируется входной образ для искусственной нейронной сети, представляющий собой вектор измерений, взятый с помощью скользящего окна (рис. 8).

При формировании обучающей выборки фрагменту сигнала, соответствующего распознаваемому действию монтажника, должен соответствовать определенный вектор сигналов на выходе искусственной нейронной сети.



• *Рис. 7. Концептуальная модель системы, основанной на искусственной нейронной сети, распознающей действия оператора (монтажника)*  
 • *Fig. 7. The conceptual model of a system based on an artificial neural network that recognizes the actions of an operator (installer)*



• *Рис. 8. Принцип формирования обучающей выборки для системы, приведенной на рис. 7*  
 • *Fig. 8. The principle of forming a training set for the system shown in the fig. 7*

### Инженерная реализация системы съема информации с помощью акселерометра

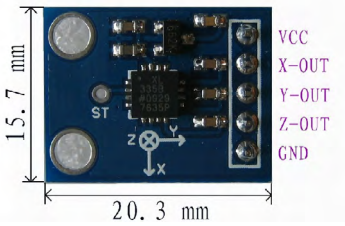
Современные акселерометры представляют собой миниатюрные датчики. В современных устройствах, например, в смартфонах, используются несколько акселерометров, объединенных в один, каждый из которых отвечает за определенную ось: X, Y или Z. Данные с такого акселерометра позволяют определить ускорение объекта в трехмерном пространстве с лучшей точностью. Технические характеристики модуля аналогового трехосного акселерометра, используемого в данном исследовании, представлены в таблице.

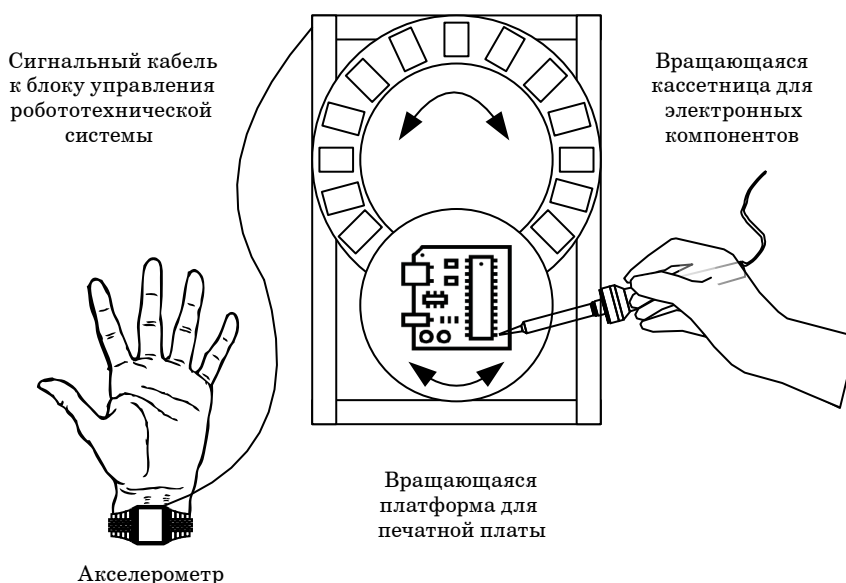
Авторами было предложено инженерное решение робота для коллаборации с монтажником в процессе выполнения работ по монтажу электронных компонентов на печатную плату (рис. 9).

Инженерное решение представляет собой металлическую или пластиковую прямоугольную раму, на которой смонтировано два небольших электродвигателя с понижающими редукторами. Один из электродвигателей вращает столик, на который кладется печатная плата для монтажа компонентов. Данный столик имеет возможность вращаться вправо или влево с дискретностью 90°. Другой двигатель вращает влево или вправо круглую кассетницу, в которую перед началом монтажа высыпается требуемое количество электронных компонентов. После того как монтажник установил на плату компоненты одного типа, он дает сигнал роботу на поворот кассетницы.

Для решения проблемы распознавания движений оператора в процессе сборки печатной платы используется браслет с акселерометром на руке оператора-человека. Блок управления роботом помогает ему распознавать движения оператора,

- *Технические характеристики модуля GY-61 на основе аналогового трехосного акселерометра ADXL335*
- *Technical characteristics of the GY-61 module based on the analog three-axis accelerometer ADXL335*

	Техническая характеристика	Размерность	Значение
	Напряжение питания	В	3...5
	Потребляемый ток	мкА	350
	Диапазон измерений	g	-3,6...3,6
	Чувствительность	мВ/g	300
	Температура эксплуатации	°С	-40...+85
	Размеры	мм	20,3×15,7
	Вес	г	5



- *Рис. 9. Инженерное решение коллаборативного робота*
- *Fig. 9. Collaborative robot engineering solution*

в ответ на которые робот ассистирует, например, вращая платформу с печатной платой в определенном направлении. Имитационная модель коллаборации человека и робота (см. рис. 5), подключенная к реальному акселерометру, показала принципиальную возможность съема сигнала таким способом – робот распознает движения руки.

## Заключение

Переход к Индустрии 5.0 может ускориться с появлением технологии, которая позволит роботам «думать за себя» или «думать, как человек» и самообучаться. В случае успешно разработанной и внедренной технологии все рутинные действия в процессе создания ценности перейдут к роботу или роботизированной системе, а более творческие задачи останутся за человеком [12].

Рассмотренные технические решения позволили выявить направление для построения более простой технологии по повышению эффективности коллаборации человека и робота в процессе сборочно-монтажных работ в радиоэлектронном приборостроении – технологии, использующей акселерометр для получения сигнала о движениях человека с дальнейшим распознаванием «образов» с помощью устройств, реагирующих, когда сигнал превышает заранее заданное пороговое значение. Более гибкая, но и более дорогостоя-

щая в реализации технология – использование предварительно обученной искусственной нейронной сети для распознавания «образов».

Для функционирования системы распознавания не всегда обязательно использовать три координаты акселерометра:  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Иногда достаточно двух координат либо одной, получаемой в результате суммирования сигналов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Разработанная и протестированная имитационная модель, реализованная в *Simulink*, наглядно показывает возможность считывания сигналов с помощью акселерометра и последующего их распознавания.

Эра коллаборативных роботов только начинается, так как еще не до конца раскрыт потенциал технологии внедрения искусственного интеллекта. Роботы обычно небольшие, гибкие, простые в программировании и благодаря своим функциям безопасности способны работать с людьми в общем рабочем пространстве. Использование роботов позволяет снизить влияние человеческого фактора, приводит к росту производительности труда на предприятии, уменьшает себестоимость продукции. Выполнение поставленных задач осуществляется роботами с высокой точностью, независимо от уровня сложности и степени безопасности. Полученные в исследовании результаты доказывают, что предложенные технологии могут служить основой для внедрения роботов на предприятия радиоэлектронного приборостроения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тенденции развития роботизации в РФ. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/tax/deloitte-rpa-survey.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).
2. Research and markets. 2017. Collaborative robots market: global industry analysis, trends, market size and forecasts up to 2023. URL: <https://www.researchandmarkets.com/search.asp?q=Collaborative+Robots+Market%3A+Global+Industry+Analysis%2C+Trends%2C+Market+Size+and+Forecasts+up+to+2023> (дата обращения: 24.12.2022).
3. Использование коллаборативных роботов в промышленности. URL: <https://trioicorp.ru/news/post/ispolzovanie-kollaborativnykh-robotov-v-promyshlennosti> (дата обращения: 21.12.2022).
4. Breazeal C., Dautenhahn K., Takayuki K. Social robotics // Springer handbook of robotics / eds by Siciliano Bruno, Khatib Oussama. Berlin: Springer, 2016. P. 1935–1972.
5. Концепция Индустрии 5.0. URL: <http://industry5.ru/koncept> (дата обращения: 20.12.2022).
6. Nahavandi S. Industry 5.0 – a human-centric solution // Sustainability. 2019. № 11 (16). P. 4371. Doi: 10.3390/su11164371.
7. de Nóbrega Nogueira R. Self-adaptive cobots in cyber-physical production systems. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019. 78 p.
8. Hoffman G., Breazeal C. Collaboration in human-robot teams. AIAA 1<sup>st</sup> Intelligent systems technical conference. 2004. Doi: 10.2514/6.2004-6434.
9. Chandrasekaran B., Conrad J. M. Human-robot collaboration: a survey. Southeast con. 2015. P. 1–8. Doi: 10.1109/SECON.2015.7132964.
10. Mutlu B., Terrell A., Huang C. M. Coordination mechanisms in human-robot collaboration // Proceedings of the Workshop on collaborative manipulation, 8<sup>th</sup> ACM/IEEE International conference on human-robot interaction. 2013. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235838952\\_Coordination\\_Mechanisms\\_in\\_Human-Robot\\_Collaboration/link/0c960515ef7d53446100000/download](https://www.researchgate.net/publication/235838952_Coordination_Mechanisms_in_Human-Robot_Collaboration/link/0c960515ef7d53446100000/download) (дата обращения: 20.12.2022).

11. *Cakmak M., Hoffman G., Thomaz A.* Computational human-robot interaction // Foundations and trends in robotics. 2016. Vol. 4, № 2-3. P. 104–223. Doi: 10.1561/23000000049.
12. *Jarrassé N., Sanguineti V., Burdet E.* Slaves no longer: Review on role assignment for human-robot joint motor action (PDF) // Adaptive behavior. 2014. № 22. P. 70–82. Doi: 10.1177/1059712313481044.

## REFERENCES

1. Trends in the development of robotics in the Russian Federation. Available from: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/tax/deloitte-rpa-survey.pdf> [Accessed 08 December 2022].
2. Research and markets. 2017. Collaborative robots market: global industry analysis, trends, market size and forecasts up to 2023. Available from: <https://www.researchandmarkets.com/search.asp?q=Collaborative+Robots+Market%3A+Global+Industry+Analysis%2C+Trends%2C+Market+Size+and+Forecasts+up+to+2023> [Accessed 24 December 2022].
3. The use of collaborative robots in industry. Available from: <https://trioicorp.ru/news/post/ispolzovanie-kollaborativnykh-robotov-v-promyshlennosti> [Accessed 21 December 2022].
4. Breazeal C., Dautenhahn K., Takayuki K. Social robotics. Springer handbook of robotics / eds by Siciliano Bruno, Khatib Oussama. Berlin: Springer; 2016, pp. 1935–1972.
5. Industry 5.0 concept. Available from: <http://industry5.ru/koncept> [Accessed 20 December 2022].
6. Nahavandi S. Industry 5.0 – a human-centric solution. Sustainability. 2019;11(16):4371. Doi: 10.3390/su11164371.
7. de Nóbrega Nogueira R. Self-adaptive cobots in cyber-physical production systems. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2019. 78 p.
8. Hoffman G., Breazeal C. Collaboration in human-robot teams. AIAA 1st Intelligent systems technical conference. 2004. Doi: 10.2514/6.2004-6434.
9. Chandrasekaran B., Conrad J. M. Human-robot collaboration: a survey. Southeast con. 2015, pp. 1–8. Doi: 10.1109/SECON. 2015. 7132964.
10. Mutlu B., Terrell A., Huang C. M. Coordination mechanisms in human-robot collaboration. Proceedings of the Workshop on collaborative manipulation, 8th ACM/IEEE International conference on human-robot interaction. 2013. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/235838952\\_Coordination\\_Mechanisms\\_in\\_Human-Robot\\_Collaboration/link/0c960515ef7d53446100000/download](https://www.researchgate.net/publication/235838952_Coordination_Mechanisms_in_Human-Robot_Collaboration/link/0c960515ef7d53446100000/download) [Accessed 20 December 2022].
11. Cakmak M., Hoffman G., Thomaz A. Computational human-robot interaction. Foundations and trends in robotics. 2016;4(2-3):104–223. Doi: 10.1561/23000000049.
12. Jarrassé N., Sanguineti V., Burdet E. Slaves no longer: Review on role assignment for human-robot joint motor action (PDF). Adaptive behavior. 2014;(22):70–82. Doi: 10.1177/1059712313481044.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Смещук Екатерина Александровна**, магистрант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – умные фабрики, инновационное роботостроение, Индустрия 4.0, анализ данных.

**Щеников Ярослав Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – Индустрия 5.0, модели и технологии автоматизация промышленных процессов.

Поступила в редакцию 06.02.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

**Smeshchuk Ekaterina A.**, Master at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – smart factories, innovative robotics, Industry 4.0, data science.

**Shchenikov Yaroslav A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – Industry 5.0, models and technologies of industrial processes automation.

Received 06.02.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

Научная статья  
УДК 331.443

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-20-24

## Организационная робастность как особенность эволюции иерархических структур управления

Станислав Анатольевич Назаревич<sup>1</sup>

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

Анастасия Юрьевна Меркулова<sup>1</sup>

merkulova-amail@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6055-369X

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

**Аннотация.** Описываются риски, создаваемые внешней средой, оказывающие влияние на ход протекания технологических процессов в структурном подразделении. Аргументирована необходимость применения инструментов хронометрии с целью расчета устойчивости организационных структур управления к дестабилизирующим факторам на основе ортогонального массива Тагути.

**Ключевые слова:** робастность, ортогональные массивы, организационная структура

**Для цитирования:** Назаревич С. А., Меркулова А. Ю. Организационная робастность как особенность эволюции иерархических структур управления // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 20–24. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-20-24.

Original article

## Organizational robust as a feature evolutions of hierarchical management structures

Stanislav A. Nazarevich<sup>1</sup>

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

Anastasia Yu. Merkulova<sup>1</sup>

merkulova-amail@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6055-369X

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

**Abstract.** The article describes the risks created by the external environment that affect the course of technological processes in a structural unit. The necessity of using chronometry tools to calculate the stability of organizational management structures to destabilizing factors based on the Taguchi orthogonal array is argued.

**Keywords:** robustness, orthogonal arrays, organizational structure

**For citation:** Nazarevich S. A., Merkulova A. Yu. Organizational robust as a feature evolutions of hierarchical management structures. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):20–24. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-20-24.

### Введение

В настоящее время большинство организационных систем подвержено высоким стохастическим рискам из-за нестабильной геэкономической ситуации. В традиционных системах менеджмента хорошо известны инструменты нивелирования рисков, создаваемых внешней средой, такие как PEST-анализ, SPACE-анализ и другие [1–3]. Основные факторы и техники снижения рисков событий представлены в стандартах ГОСТ Р ИСО 31000-2019 и ГОСТ Р 51897-2021. Однако существует необходимость в создании инструментов и методик оценки устойчивости части организационной системы, а именно – структурного подразделения или

отдела, по отношению к внутренним воздействующим факторам, проявившимся в результате определенных событий во внешней среде. Устойчивое состояние организационных систем достигается путем планомерной эволюции через применение методов непрерывного совершенствования либо адресным реинжинирингом части организационной системы. Однако перед внедрением подобных решений целесообразно провести оценку робастности процессов организационной системы. Также построение робастных процессов по отношению как к внешним, так и к внутренним рискам в организации позволит снизить вариабельность показателей качества готовой продукции.

## Основные положения

В качестве объекта исследования организационной робастности рассмотрено производственное структурное подразделение с совокупностью основных и обеспечивающих процессов. В результате проведения инструментального хронометража по местам рабочих операций исследуемого структурного подразделения созданы визуализированные отчеты и графики распределения рабочего времени в ходе протекания технологического процесса. Исследование проводилось при непосредственном наблюдении за реализацией основных функций подразделения, в режиме стабильного выполнения технологического процесса, а также при вмешательстве в технологический процесс других участников производственной системы. В табл. 1 представлен набор выявленных и зафиксированных факторов, оказывающих влияние на стабильность производственных процессов, для которых была сформирована шкала текущих и целевых значений.

С целью упорядочивания факторов, оказывающих влияние на результативность отдела, необходимо провести анализ уровня независимости по отношению к непрогнозируемым управленческо-производственным ситуациям. Тем самым подтверждается необходимость оперативного проведения последовательной экспертизы организационной устойчивости структурного подразделения с применением метода робастного проектирования Тагути [4–6].

Методика расчета устойчивости процессов к производственным рискам основывается на определении коэффициента «сигнал/шум», который показывает отношение контролируемых факторов к различного рода помехам, в нашем случае дефектам. Выходной характеристикой является качество изделия, соответственно, коэффициент устойчивости рассчитывается по формуле для «номинального значения» (1):

$$SN_i = 10 \log \frac{\bar{P}_i^2}{s_i^2}, \quad (1)$$

где среднее значение числа дефектов  $P$  в  $i$ -й строке (2):

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} P_{i,u}, \quad (2)$$

Дисперсия числа дефектов  $P$  в  $i$ -й строке (3):

$$s_i^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{u=1}^{N_i} (P_{i,u} - \bar{P}_i)^2, \quad (3)$$

$N_i$  – число испытаний для эксперимента  $i$ ;  $u$  – номер эксперимента.

Робастное проектирование по Тагути базируется на использовании ортогональных массивов, которые комбинируют набор значений факторов, тем самым создавая условия для проведения опытов. Основным преимуществом массивов является возможность принятия решений на основании минимального количества экспериментов. В зависимости от количества исследуемых факторов используются массивы разных размеров. Для семи рассматриваемых рисков применим ортогональный массив  $L_8$ .

Для каждого уровня варьирования проводится пять опытов и фиксируется количество отклонений в партии изделий, производится расчет среднего числа дефектов и отношения «сигнал/шум». Планирование эксперимента и результаты проведенных опытов отражены в табл. 2.

Для идентификации значений, влияние которых на производственные процессы минимально, на основании проведенных расчетов определяется среднее значение коэффициента устойчивости  $S/N$  каждого фактора для текущего и целевого значения. Для ортогонального массива  $L_8$  рассчитывается по формуле (4):

- Таблица 1. Внутренние воздействующие факторы
- Table 1. Internal influencing factors

	Факторы, влияющие на возникновение дефектов	Целевые значения факторов	Текущие значения факторов
A	Уборка рабочих мест	A1 = в перерывах	A2 = в рабочее время
B	Отключение энергоснабжения	B1 = отсутствуют	B2 = периодическое
C	Повреждение материалов	C1 = незначительные	C2 = сильные
D	Заболеваемость персонала	D1 = 20 %	D2 = 40 %
E	Сбой в оборудовании	E1 = отсутствуют	E2 = периодические
F	Возраст работников	F1 = 30 лет	F2 = 60 лет
G	Выполнение параллельных операций	G1 = 0	G2 = 2

- Таблица 2. Расчет коэффициентов S/N
- Table 2. Calculation of S/N ratios

№ i	Влияющие факторы управления (уровни варьирования)							Значение количества дефектов в разных партиях					Среднее $\bar{P}_i$	S/N	
	A	B	C	D	E	F	G	P1	P2	P3	P4	P5			
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0,8	5,0515
2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1,6	9,311187
3	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	0	1	1	1	12,09515
4	1	2	2	2	2	1	1	3	2	3	3	2	2	2,6	6,65447
5	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	1,6	3,132645
6	2	1	2	2	1	2	1	0	0	2	0	0	0	0,4	9,311187
7	2	2	1	1	2	2	1	0	1	2	2	1	1	1,2	9,311187
8	2	2	1	2	1	1	2	0	1	2	1	2	2	1,2	3,132645

$$S/N_{Aj} = \frac{S/N_{k,m_i} + S/N_{k,m_i} + S/N_{k,m_i} + S/N_{k,m_i}}{n}, \quad (4)$$

где j – уровень фактора; k – номер фактора; m<sub>i</sub> – номер строки; n – количество строк.

Степень влияния фактора на появление дефектов определяется как разность между коэффициентами устойчивости, где большее значение

означает большую значимость риска. Важность рисков рассчитывается по формуле (5):

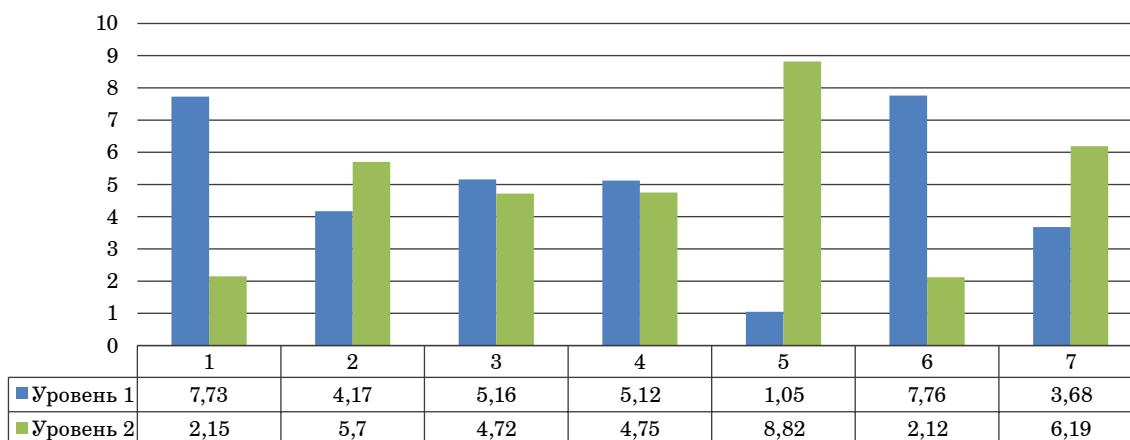
$$\Delta = \frac{S}{N_{\max}} - \frac{S}{N_{\min}}. \quad (5)$$

Полученные результаты вычислений отношений «сигнал/шум» для двух уровней и важности рисков относительно их влияния на появление отклонений в процессах занесены в табл. 3.

- Таблица 3. Вычисление среднего значения S/N и определение степени влияния фактора
- Table 3. Calculation of the average value of S/N and determination of the degree of influence of the factor

Факторы	A	B	C	D	E	F	G
Уровень 1	7,73	4,17	5,16	5,12	1,05	7,76	3,68
Уровень 2	2,15	5,7	4,72	4,75	8,82	2,12	6,19
Δ	5,58	1,53	0,44	0,37	7,77	5,64	2,51

Диаграмма средних значений коэффициента устойчивости



- Диаграмма средних для факторов A-G на двух уровнях
- Diagram of means for factors A-G at two levels

- Таблица 4. Комбинирование значений факторов
- Table 4. Combining factor values

Фактор		Имеющийся	Оптимальный	Пояснение
A	Уборка рабочих мест	A2 = в рабочее время	A1 = в перерывах	A1 имеет бóльший S/N
B	Отключение энергоснабжения	B2 = периодическое	B2 = периодическое	B2 имеет бóльший S/N
C	Повреждение материалов	C2 = сильные	C2 = сильные	C2 имеет бóльший S/N
D	Заболеваемость персонала	D2 = 40 %	D1 = 20 %	D1 имеет бóльший S/N
E	Сбои в оборудовании	E2 = периодические	E2 = периодические	E2 имеет бóльший S/N
F	Возраст работников	F2 = 60 лет	F1 = 30 лет	F1 имеет бóльший S/N
G	Выполнение параллельных операций	G2 = 2	G2 = 2	G2 имеет бóльший S/N

Для удобства обработки данных применяется визуализация итогов посредством нанесения средних значений коэффициента на диаграмму (рисунок), наглядное отображение результатов упрощает выбор комбинации факторов.

Бóльшие значения S/N свидетельствуют о меньшем реагировании на воздействующие факторы риска, следовательно, необходимо максимизировать значение коэффициента.

В табл. 4 скомбинированы значения воздействующих факторов, позволяющие снизить число дефектов в партии на основе степени влияния каждого фактора и соответствующих значений [7–9].

Наиболее существенное влияние на возникновение отклонений оказывают риски, возникающие при уборке рабочих мест, а также сбои в оборудовании и возраст работников. Следовательно, управлению данными рисками и стоит уделить бóльшее внимание и с них стоит

начать формирование оптимального набора значений факторов.

### Заключение

С помощью представленной методики возможно осуществлять мониторинг организационной устойчивости и оценку факторов, оказывающих влияние на протекание технологического процесса, а также формировать представление о необходимости структурных изменений и величине влияния факторов внешней среды на приемлемое протекание процессов. Управление устойчивостью организационных систем позволит стабилизировать технологические процессы за счет уменьшения колебания факторов, что ведет к повышению качества продукции. Методика применима при проектировании, а также на стадии производства продукции.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Серенков П. С., Белова Е. А., Рудая А. Н. Современные тенденции развития методов обеспечения качества. Минск: БНТУ, 2021. 200 с.
2. Лунева Е. Е., Дмитриева Е. А., Цапко Г. П. Использование метода робастного проектирования Тагути для оптимизации бизнес-процессов // Экономика, статистика и информатика. Вестн. УМО. 2011. № 3. С. 5.
3. Адлер Ю. П., Маркелова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
4. Талай А. М. Управление качеством. Робастное проектирование. Методы Тагути. М.: СЕЙФИ, 2002. 384 с.
5. Гродзенский С. Я. Управление качеством: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Проспект, 2018. 320 с.
6. Тагути Г. М. Оптимальное проектирование как техника качества // Методы менеджмента качества. 2003. № 9. С. 27–35.
7. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / пер. с англ. 10-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2021. 417 с.
8. Глудкин О. П., Горбунов Н. М., Гуров А. И., Зорин Ю. В. Всеобщее управление качеством: учеб. для вузов / под ред. О. П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
9. Борисова Т. А., Дмитриев В. Я. Системы менеджмента качества: учеб. пособие / под ред. Е. В. Ушаковой. СПб.: С.-Петербург. ун-т технол. упр. и экон., 2017. 168 с.



10. Фольмут Х. Й. Инструменты контроллинга от А до Я: пер. с нем. / под ред. и с предисл. М. Л. Лукашевича и Е. Н. Тихоненковой. М.: Финансы и статистика, 2001. 288 с.

## REFERENCES

1. Serenkov P. S. Belova E. A., Rudaya A. N. Modern trends in the development of quality assurance methods: educational and methodological complex for academic discipline. Minsk: BNTU; 2021. 200 p.
2. Luneva E. E. Using the taguchi robust design method to optimize business processes. Journal of statistics and economics, 2011;(3):5. (In Russ.).
3. Adler Yu. P., Markelova E. V., Granovsky Yu. V. Planning an experiment in the search for optimal conditions. Moscow: Nauka; 1976. 279 p. (In Russ.).
4. Talai A. M. Quality control. Robust design. Taguchi methods. Moscow: SEYFI; 2002. 384 p. (In Russ.).
5. Grodzensky S. Ya. Quality management: textbook. 2<sup>nd</sup> ed., revised and additional. Moscow: Prospekt; 2018. 320 p. (In Russ.).
6. Taguchi G. M. Optimal design as a quality technique. Methods of quality management. 2003;(9):27–35. (In Russ.).
7. Deming E. Out of the crisis: a new paradigm for managing people, systems and processes; translated from English. 10<sup>th</sup> ed. Moscow: Alpina Publisher; 2021. 417 p.
8. Gludkin O. P., Gorbunov N. M., Gurov A. I., Zorin Yu. V. General quality management: a textbook for universities; eds. by O. P. Gludkin. Moscow: Radio and communication; 1999. 600 p. (In Russ.).
9. Borisova T. A., Dmitriev V. Ya. Quality management systems: textbook; eds. by E. V. Ushakova. SPb.: St. Petersburg. un-t technol. ex. and economy; 2017. 168 p. (In Russ.).
10. Folmut H. J. Controlling tools from A to Z / translated from German; eds by and with preface M. L. Lukashevich and E. N. Tikhonenkova. Moscow: Finance and statistics; 2001. 288 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Назаревич Станислав Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оценка технического уровня, анализ состояния организационных систем.

**Меркулова Анастасия Юрьевна**, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – применение статистических методов для решения производственных проблем.

Поступила в редакцию 01.02.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

**Nazarevich Stanislav A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – assessment of the technical level, analysis of the state of organizational systems.

**Merkulova Anastasia Yu.**, Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the application of statistical methods for solving production problems.

Received 01.02.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Автоматизация системы контроля качества при производстве лакокрасочных изделий

Виктория Сергеевна Пузырева<sup>1</sup>

✉ vikap1999@mail.ru

Александр Валерьевич Чабаненко<sup>1</sup>

a@chabanenko.ru

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

**Аннотация.** Рассматриваются потенциальные направления автоматизации метода анализа распределения по размерам частиц тонкого помола. Разрабатывается алгоритм процесса. Предлагаются возможности для его усовершенствования.

**Ключевые слова:** лазерная дифракция, усовершенствование метода, лакокрасочные изделия, частицы тонкого помола

**Для цитирования:** Пузырева В. С., Чабаненко А. В. Автоматизация системы контроля качества при производстве лакокрасочных изделий // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 25–29. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-25-29.

Original article

## Automation of the quality control system in the production of paint and varnish products

Victoria S. Puzyreva<sup>1</sup>

✉ vikap1999@mail.ru

Alexander V. Chabanenko<sup>1</sup>

a@chabanenko.ru

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

**Abstract.** The article discusses potential directions for improving and automating the method for analyzing the size distribution of particles of fine grinding. The process algorithm is being developed. Opportunities for improvement are offered.

**Keywords:** laser diffraction, improvement of the method, paint and varnish products, fine particles

**For citation:** Puzyreva V. S., Chabanenko A. V. Automation of the quality control system in the production of paint and varnish products. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):25–29. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-25-29.

### Введение

Химическая, и прежде всего лакокрасочная, промышленность стремительно развивается как во всем мире, так и в России, в Санкт-Петербурге в частности. Большая часть лакокрасочной продукции изготавливается на основе порошков тонкого помола, к качеству которых с каждым годом предъявляются все более высокие требования [1].

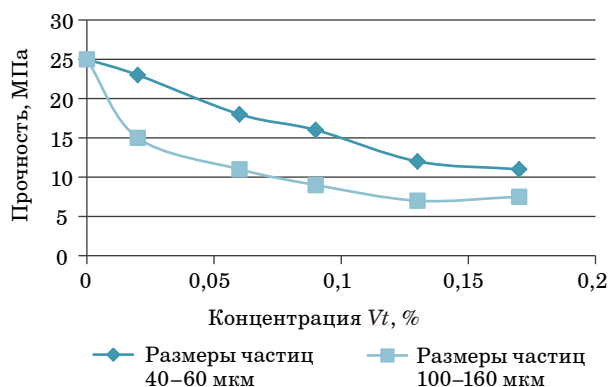
ГОСТ 2093-82 предписывает использование ситового анализа для изучения гранулометрического состава. Однако наибольшим диапазоном измерения обладает метод лазерной дифракции, который на основании данных об интенсивности проецируемых лучей способен сделать вывод о размере частиц. Но целесообразно

ли использовать данный метод? Насколько он применим к измерению частиц порошков тонкого помола?

**Гипотеза 1. Углубленный анализ распределения частиц по размерам и форме лишен смысла.**

Анализ размера и формы частиц важен для контроля качества, который позволяет поддерживать и документировать характеристики частиц. Отклоняющиеся от нормы размер или форма в худшем случае могут означать, что конечный продукт непригоден для использования и в последующем производственном процессе может возникнуть сбой (рис. 1).

Таким образом, детальная информация о форме и размерах частиц необходима, поэтому гипотеза 1 отвергается.



- Рис. 1. Зависимость прочности композитов от содержания частиц при разных размерах [2, 3]
- Fig. 1. Dependence of the strength of composites on the content of particles at different sizes [2, 3]

**Гипотеза 2. Отсутствует технология, позволяющая измерить частицы как с относительно малым, так и с относительно большим размером.**

Безусловно, все методы анализа имеют ограничения, в том числе по анализируемому диапазону. Наибольшим диапазоном обладает как раз метод лазерной дифракции.

Компания ООО «РБС», занимающаяся подробным исследованием рынков по различным запросам, провела исследование о самом эффективном методе распределения размеров частиц. Выяснилось, что одним из ведущих инновационных центров области является компания *Netzsch Premier Technologies* (Экстон, США). В одной из их лабораторий с использованием собственных технологий порошок пигмент был измельчен до идеальной консистенции, которая впоследствии была протестирована по всем показателям. Распределение размеров представлено в таблице.

Так, наименьший средний размер составил 1,16 мкм, а наибольший – 95,6 мкм. Большинство промышленных порошковых красок имеют размер частиц от 10 до 100 мкм. Для электростатиче-

- Результаты измерения пигментов на LA-960 при различном времени помола [2]
- The results of measuring pigments on LA-960 at different grinding times [2]

Время шлифования, мин	Среднее геометрическое, мкм	Средний размер, мкм	Средний размер в сравнении со средней величиной, %
0 (старт)	30,9	95,6	10
30	1,01	1,48	85
60	0,895	1,23	92,5
90	0,812	1,16	99,5

ского метода напыления порошка приемлемыми являются частицы с размерами от 15 до 75 мкм, а идеальными – от 25 до 45 мкм. Таким образом, метод лазерной дифракции имеет большой потенциал, и гипотеза № 2 опровергается.

**Гипотеза 3. Существующие методы не могут быть комбинированы.**

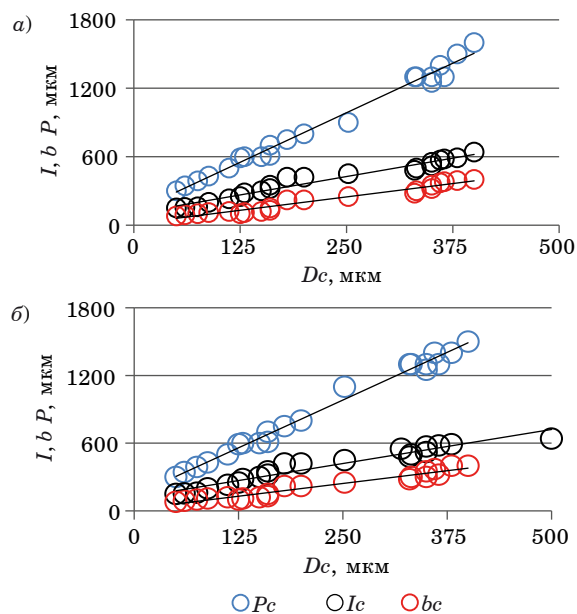
Путем перебора была определена наиболее совместимая пара методов: микроскопический и лазерная дифракция. Было доказано, что измерение параметров методом лазерной дифракции (рис. 2, а) и микроскопическим методом (рис. 2, б) совпадают на 60 %. При этом микроскопический метод дает представление о форме частиц.

Таким образом, гипотеза № 3 отвергается: методы могут быть комбинированы в том случае, если это действительно целесообразно.

### Разработка способа автоматизации метода

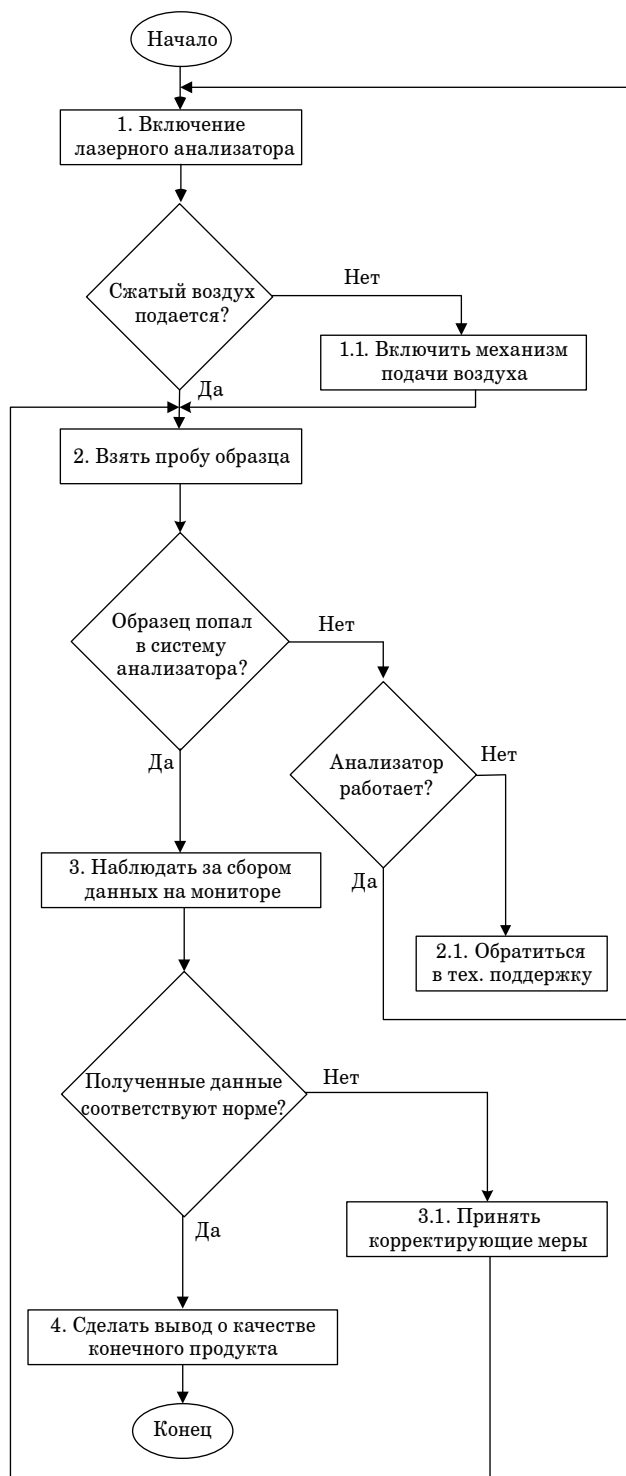
Алгоритм нового автоматизированного анализа распределения частиц тонкого помола по размерам представлен на рис. 3.

Рассмотрим этап 3, который подразумевает считывание и анализ частиц по размерам и форме. Предлагается усовершенствовать имеющуюся установку, дополнив измерительную ячейку сверхскоростной цифровой камерой.



- Рис. 2. Зависимость между средними геометрическими параметрами зерен фракций: а – метод лазерной дифракции; б – микроскопический метод [4]

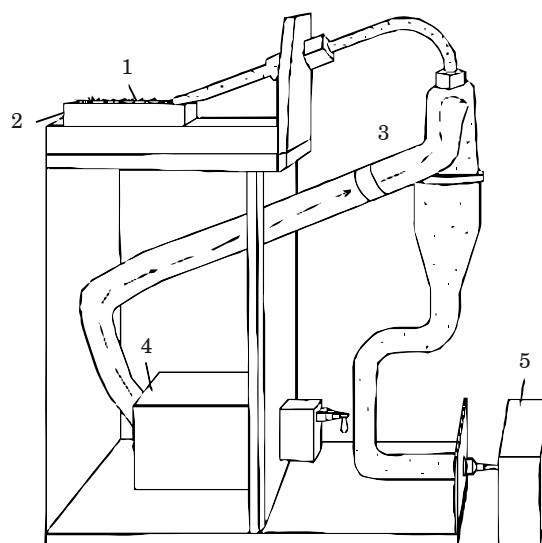
• Fig. 2. Dependence between the average geometrical parameters of grains of fractions: а – by the laser diffraction method; б – by the microscopic method [4]



• Рис. 3. Алгоритм процесса анализа  
 • Fig. 3. Analysis process algorithm

Схематичное изображение установки представлено на рис. 4.

Исследуемый образец 1 устанавливается на лоток 2 и всасывается в систему анализатора. Система доставки образца 3 направляет сжатый воздух 4 через встроенные сопла, обеспечивая



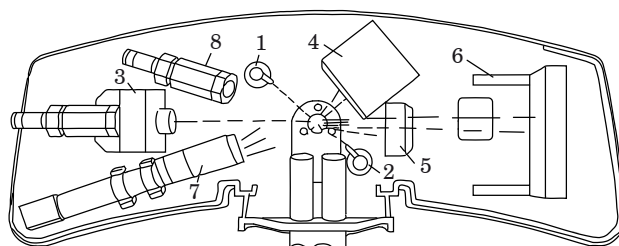
• Рис. 4. Схематичное изображение разработанного лазерного анализатора  
 • Fig. 4. Schematic representation of the developed laser analyzer

«торможение» частиц материала перед подачей в измерительную ячейку 5.

Схематичное изображение измерительной ячейки представлено на рис. 5.

Для измерения используются лазерные диоды и системы анализа изображений. Оптическая система состоит из трех диодных лазеров 1, 2, 3, трех постоянно включенных детекторов 4, 5, 6, находящихся в фиксированных точках. Лазерные детекторы улавливают свет, рассеянный под углом 165°. Одновременно отдельный светодиодный источник света 7 освещает кювету с образцом, а высокоскоростная цифровая камера 8 фиксирует изображение частиц. Данные анализируются с помощью специального программного обеспечения, использующего функциональную эмпирическую модель:

$$\hat{y} = 100,28 - 6,87X_1 - 4,89X_3 - 7,48X_1X_2 - 7,29X_1X_3 - 7,03X_2X_3,$$



• Рис. 5. Схематичное изображение оптической системы разработанного лазерного анализатора  
 • Fig. 5. Schematic representation of the optical system of the developed laser analyzer

где  $X_1, X_2, X_3$  – это факторы, влияющие на частицу [4].

Таким образом, потребитель получает точные данные о характеристиках и параметрах частиц. Система анализирует не только размер, но и предоставляет изображение исследуемых частиц.

## Заключение

Для того чтобы решить вопрос о наличии анализатора формы частиц, было решено разработать такую систему, которая в процессе анализа

«затормаживала» бы частицы для возможности запечатлеть их форму на камеру.

Таким образом, система успевает в короткий срок проанализировать данные частицы и запечатлеть форму, при этом потребитель получает точные сведения о характеристиках и параметрах частиц без прямого участия человека. Такой детальный анализ способствует улучшению качества лакокрасочных изделий, снижая человеческий фактор, что значительно увеличивает их конкурентоспособность на рынке.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузырева В. С. Анализ лакокрасочной промышленности в мире, России, регионе // Студ. науч. форум – 2021: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 20 окт. 2021 г. № 7. Пенза: Наука и просвещение, 2021. С. 13–16.
2. Салви П. Измельчение и диспергирование. URL: <https://www.netzsch-grinding.com/ru> (дата обращения: 12.09.2022).
3. Пузырева В. С. Построение функциональной эмпирической модели распределения по размерам частиц тонкого помола // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. LIV Междунар. науч.-практ. конф. 15 марта 2022 г. № 9. Пенза: Наука и просвещение, 2022. С. 10–14.
4. Пузырева В. С. Анализ рискованности проекта // Актуальные вопросы современной науки и образования: сб. ст. XIX Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и просвещение, 2022. С. 10–12.

## REFERENCES

1. Puzyreva V. S. Analysis of the paint and varnish industry in the world, Russia, the region. Student scientific forum 2021: collection of articles of the International scientific and practical conference. 20 October 2021. Penza; 2021, vol. 7, pp. 13–16. (In Russ.).
2. Salvi P. Grinding and dispersion. 2021. Available from: <https://www.netzsch-grinding.com/en> [Accessed 12 September 2022].
3. Puzyreva V. S. Construction of a functional empirical model for the size distribution of particles of fine grinding. Basic and applied scientific research: current issues, achievements and innovations: collection of articles LIV of the International scientific and practical conference. 15 March 2022. Penza; 2022, vol. 9, pp. 10–14. (In Russ.).
4. Puzyreva V. S. Project risk analysis. Topical issues of modern science and education: collection of articles of the XIX International scientific and practical conference. Penza; 2022, vol. 9, pp. 10–12. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Пузырева Виктория Сергеевна**, магистрант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – средства для покрытий и их технология, лакокрасочные материалы.

**Чабаненко Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского

**Puzyreva Victoria S.**, Master at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – means for coatings and their technology, paints and varnishes.

**Chabanenko Alexander V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St.

государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – качество, аддитивные технологии, квалиметрия.

Поступила в редакцию 31.01.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality, additive technologies, qualimetry.

Received 31.01.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Обеспечение контроля качества стабилизации положения объектов на основе инновационного технического и метрологического обеспечения

Егор Дмитриевич Макаров<sup>1</sup>

✉ travellerw3@gmail.com

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

**Аннотация.** Рассмотрены особенности применения полупроводниковых датчиков, спроектированных по технологии MEMS, для решения задач стабилизации положения объектов. Предложена методика оценки качества работы системы стабилизации на основе комплексного критерия качества. Предложена информационная структура, направленная на повышение качества контроля стабилизации путем минимизации времени передачи информации.

**Ключевые слова:** стабилизация положения, качество, информационная структура, MEMS-гироскоп, параллельная синхронная передача информации

**Для цитирования:** Макаров Е. Д. Обеспечение контроля качества стабилизации положения объектов на основе инновационного технического и метрологического обеспечения // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 30–35. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-30-35.

Original article

## Ensuring quality control of stabilization of the position of objects based on innovative technical and metrological support

Egor D. Makarov<sup>1</sup>

✉ travellerw3@gmail.com

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

**Abstract.** The study investigated features of the application of semiconductor sensors designed using MEMS technology to solve problems of stabilizing the position of objects. A methodics for assessing the quality of the stabilization system is proposed, based on a comprehensive quality criterion. Proposed information structure aimed at improving the quality of stabilization control by minimizing the time of information transfer.

**Keywords:** position stabilization, quality, information structure, MEMS gyroscope, parallel synchronous information transfer

**For citation:** Makarov E. D. Ensuring quality control of stabilization of the position of objects based on innovative technical and metrological support. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):30–35. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-30-35.

### Введение

Контроль стабилизации является одной из основных задач автоматизированных систем управления, разрабатываемых для изделий аэрокосмической, автомобильной, судостроительной промышленности. Динамичные темпы развития этих отраслей предоставляют широкие возможности по внедрению более технологичных решений, однако стоит отметить, что процессу их внедрения должны сопутствовать разработка новых критериев оценки качества работы данных решений в составе систем управления.

Прогресс развития чувствительных элементов, или датчиков, построенных по технологии MEMS, делает возможным рассмотреть их при-

менение для решения задач стабилизации ввиду их невысокой стоимости и компактных размеров. Однако в статье [1] показано, что их применение в автономном режиме предусматривает увеличение погрешностей по причине конструктивных особенностей этих датчиков, поэтому следует рассматривать их применение в качестве дополняющей подсистемы.

Достичь снижения ошибки при измерении можно путем увеличения числа MEMS-гироскопов и их дальнейшего комплексирования с применением фильтра Калмана – данная задача решалась в конце прошлого столетия [2], однако на практике предложенные для идеальных условий методы не всегда применимы. В статье [3] рассмотрены варианты оценки по-

грешности для двух датчиков, выдающих данные с отличными друг от друга временными периодами. Разница этих периодов может быть связана в том числе с разностью в формировании канала данных между вычислительным блоком и датчиком. Решить данную проблему можно путем построения параллельных информационных каналов с одинаковым алгоритмом взаимодействия с вычислительным блоком в рамках единой информационной структуры при соблюдении условия синхронизации получаемых данных. Ранее данный вопрос был рассмотрен при проектировании измерительного устройства [4]. Также стоит отметить, что применение большого количества однотипных датчиков может минимизировать влияние формируемых датчиками временных периодов на синхронизацию в реальном масштабе времени снимаемых показаний.

Разрабатываемая система контроля стабилизации является продуктом высокотехнологичного производства, развитие которого, согласно концепции Индустрии 4.0, подразумевает применение инновационных процессов и повышение качества выпускаемой продукции [5].

## Материалы и методы исследования

Структура системы стабилизации и контроля стабилизации объекта, обобщенно представленного в виде гироплатформы, разработана с применением гироскопов, которые используются для стабилизации направления движения, измерения поворотной скорости и угла наклона в инерциальном пространстве.

Основой конструкции традиционного гироскопа служит карданов подвес с закрепленным внутри вращающимся телом. Карданов подвес позволяет закрепленному внутри него вращающемуся телу (например, диску) сохранять неизменное направление оси вращения независимо от ориентации самого подвеса и при отсутствии воздействия моментов внешних сил. Как известно, при вращении тел могут возникать прецессия, нутация и сила Кориолиса. Принцип работы большинства *MEMS*-гироскопов основан на эффекте Кориолиса.

Управление чувствительным элементом и измерение его колебаний осуществляется обычно с помощью электростатической системы. Емкостные датчики позволяют измерить высокочастотные угловые колебания чувствительного элемента по обобщенным координатам. Угловые колебания возбуждаются с помощью создаваемого электростатическим приводом момента.

Основным недостатком *MEMS*-гироскопов является наличие накапливаемой ошибки при измерении показаний, вызванной наличием дрейфа нулевого значения, или дрейфа нуля. Это явление, при котором показания гироскопа в состоянии покоя отличны от нуля. Для оценки дрейфа и дальнейшего сокращения его влияния на общую погрешность измерений применяются различные методы устранения, в зависимости от степени ответственности задачи, решением которой занимается *MEMS*-гироскоп. В общем случае погрешность рассматривается как совокупность двух составляющих – систематической ошибки  $\varepsilon_R$  и случайной ошибки  $\varepsilon_S$ . Тогда погрешность дрейфа нуля может быть записана как:

$$\varepsilon = \varepsilon_S + \varepsilon_R.$$

Стоит отметить, что под систематической составляющей понимается величина постоянная или имеющая закономерность при последующих измерениях, которую допустимо представить в виде зависимости:

$$\varepsilon_S = f(t, n),$$

где  $t$  – период времени, за который формируется ошибка,  $n$  – количество измерений, произведенных за период времени  $t$ .

Под случайной ошибкой понимается величина, не имеющая никаких закономерностей от измерений и не являющаяся постоянной на протяжении всех измерений.

Одним из наиболее распространенных способов для оценки ошибки измерений *MEMS*-гироскопа является метод наименьших квадратов [6] ввиду его удобства с точки зрения простоты расчетов. Однако данный метод имеет ряд ограничений – применение как чрезмерно больших, так и чрезмерно малых степеней полиномов может отрицательно сказаться на оценке погрешности, а также не является достаточно гибким методом в некоторых случаях [7].

Наибольший интерес с точки зрения оценки ошибки измерения представляет применение вариации Аллана. Точность оценки при помощи данной вариации тем выше, чем меньше временной интервал выбран и чем больше данных интервалов. Анализ графика, построенного с применением данной вариации, позволит определить, в течение какого периода времени величина влияния дрейфа нуля становится наиболее стабильной и может быть оценена для дальнейшего нивелирования.

После сбора данных и анализа всей материальной составляющей системы данных допу-



стимо построить алгоритм калибровки MEMS-гироскопов [8] с учетом выявленных в результате исследования особенностей поведения системы при предварительном запуске.

Принимая во внимание вышеизложенные особенности измерителей и способы минимизации их влияния в рамках системы стабилизации, предлагается оценить возможность повышения качества при применении группы однотипных измерителей с использованием методики оценки качества системы стабилизации.

Цель работы – обеспечение контроля качества стабилизации положения объекта, представленного гироплатформой, на основе методики, учитывающей показатели качества – скорость реакции на изменение, чувствительность системы, погрешность предложенного комплексного критерия оценки и аппаратно-программной системы, реализующей методику.

Для методики оценки качества системы предлагается метод комплексной оценки уровня качества. Он позволяет с наибольшей точностью охарактеризовать качество сложного изделия, которым система стабилизации и является. В данном методе используются комплексные показатели совокупности свойств, которые, в свою очередь, зависят от показателей отдельных свойств рассматриваемого объекта. При использовании комплексных критериев необходимо выполнение условий репрезентативности, монотонности, чувствительности.

Для формирования комплексного критерия качества предлагаются следующие показатели оценки качества системы стабилизации:

- скорость реакции на изменение  $\tau$ ;
- чувствительность системы стабилизации  $S$ ;
- погрешность измерений  $E$ ;
- скорость формирования управляющих сигналов  $F$ ;
- скорость передачи данных от измерителя системы до вычислительного блока  $T$ .

Критерий оценки предлагается представить в виде:

$$Q = f(\tau_i, S_i, E_i, F_i, T_i),$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – общее число измерителей, установленных в системе.

Полагая, что величина влияния каждого из показателей пропорционально влияет на итоговую оценку качества системы, допустимо представить критерий в виде:

$$Q = \sum_{i=1}^n a\tau_i + bS_i + cE_i + dF_i + eT_i,$$

где  $a, b, c, d, e$  – коэффициенты весомости для каждого из параметров.

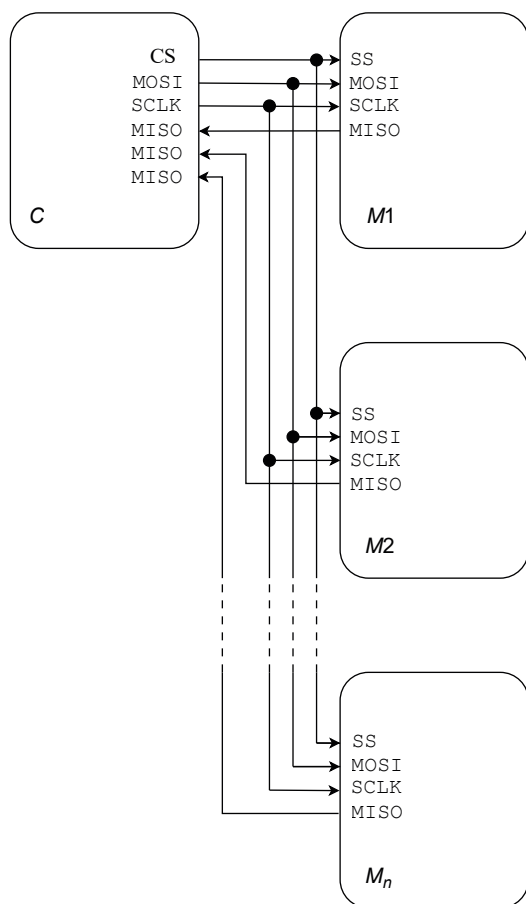
Для повышения качества ранее обозначенного параметра скорости передачи данных от измерителя системы до вычислительного блока предлагается использовать уникальную информационную систему.

Прежде всего, следует отметить, что для корректной работы предлагаемой информационной системы необходима возможность аппаратной реализации синхронной передачи информации. В рамках предлагаемой модели предъявляются требования синхронного получения данных со всех сенсоров, формирования пакета с массивом данных и передачи данного пакета в вычислительный блок с целью дальнейшей обработки полученных данных.

Задействованные в данной информационной системе сенсоры в качестве интерфейса подключения будут использовать аппаратную реализацию протокола передачи данных SPI [9] и будут работать в режиме «ведомых», как следствие, в рамках данной информационной системы будет реализован блок «ведущего» для управления группой сенсоров.

Предлагаемая инновационная информационная система графически представлена на рис. 1. Множество «ведомых» устройств  $M_1, M_2, \dots, M_n$  подключены к «ведущему» устройству  $C$ , действующему линии шины SPI.

Уникальность данной системы заключается в изменении алгоритма работы с последовательного получения информации на параллельный без видимых для «ведомых» устройств изменений. Для организации параллельной синхронной передачи информации предлагается одновременно передавать сигналы управления MOSI и обращения CS на «ведомые» блоки. Распределение сигнала выбора CS между всеми «ведомыми» позволит распределить команды выбора, управления и передачи данных от ведущего ведомым одновременно всей группе «ведомых» устройств, при этом «ведущее» устройство будет считать, что управляет лишь одним блоком. Ответные пакеты данных предлагается отправлять по индивидуальному для каждого «ведомого» блока системы каналу  $MISO_1, MISO_2, \dots, MISO_n$ , что позволит использовать максимальную скорость передачи без необходимости введения механизма приоритизации пакетов данных, который был бы необходим при использовании единого для всех канала. Если предположить, что все используемые в качестве «ведомых» блоки идентичны, такая схема позволяет получить пакет с данными, зафиксированными в единый момент времени, от всех измерителей.



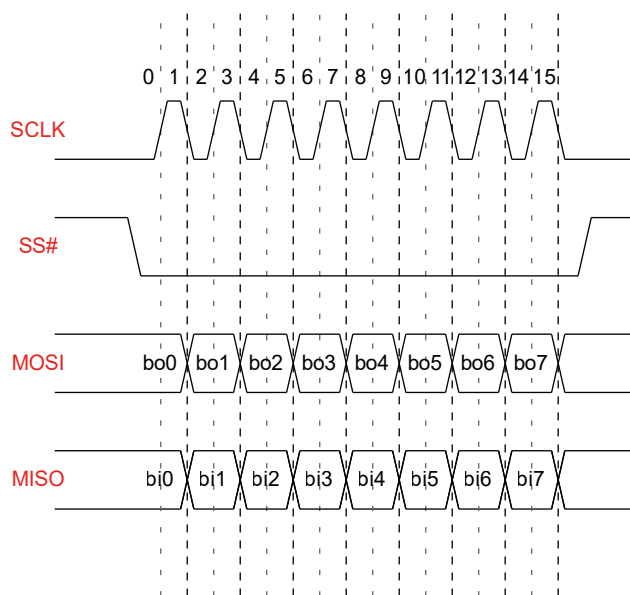
• *Рис. 1. Структура информационной системы*  
 • *Fig. 1. Information system structure*

Таким образом, минимальная величина времени отправки данных «ведомыми» будет ограничена только аппаратными возможностями самих измерителей.

В качестве блока, инициирующего передачу в информационной системе, используется программно реализуемый на ПЛИС (программной логической интегральной схеме) автомат управления записью, конфигурированием и чтением показаний датчиков, при этом для реализации синхронной работы по считыванию показаний используется единый тактовый сигнал на все используемые сенсоры.

Для дальнейшей разработки программного модуля следует предварительно построить временную диаграмму возможных состояний в системе (рис. 2).

Данная диаграмма описывает следующий процесс: когда «ведущий» формирует для дальнейшей отправки по каналу передачи данных пакет размером 1 байт или 8 бит, предварительно на выходе выбора «ведомого» CS выставляется сигнал «0», означающий готовность «ведущего» к передаче данных. Весь дальнейший



• *Рис. 2. Диаграмма состояний*  
 • *Fig. 2. State diagram*

процесс отправки может быть разбит, согласно схеме, на 16 состояний.

После передачи пакета данных становится активным флаг выполнения отправки данных, сигнал на линии CS изменяется на «1» для окончательного завершения передачи. Стоит обратить внимание на тот факт, что все нечетные операции идентичны, и в дальнейшем при написании программной реализации это следует учесть. Данная диаграмма также применима и для описания процесса приема пакета данных от «ведомого» «ведущим» с тем отличием, что для обеспечения точности принятых данных смена состояний происходит в середине состояния приема. На диаграмме это отображено серыми линиями.

## Результаты исследования

В статье рассмотрены существующие методики оценки погрешности измерений MEMS-гироскопа. Предложена методика оценки качества работы сложного объекта, представленного в виде системы стабилизации, на основе комплексного критерия качества. Для улучшения показателей критериев качества данной системы, а именно времени передачи данных от измерителя к блоку вычислений, впервые применена инновационная информационная система, основанная на доработке существующего протокола передачи данных SPI, для обеспечения параллельной синхронной передачи информации от группы измерителей.

## Заключение

Преимуществом предложенной информационной системы является ее масштабируемость при условии применения небольшого количества

простых блоков – это положительно скажется на быстродействии и количестве задействованных вычислительных ресурсов при внедрении системы в разрабатываемые устройства и программно-аппаратные комплексы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ источников погрешностей навигационной системы малого беспилотного летательного аппарата / И. В. Сергушов, Р. В. Ермаков, Ю. А. Ульянина, А. А. Серанова [и др.] // Надежность и качество: труды Междунар. симп. Т. 2. 2018. С. 53–57.
2. Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 1986. Vol. AES-22, is. 6. P. 803–805. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310815>.
3. Понятский В. М., Зенов Б. В. Комплексование измерителей при некратности частот следования показаний и выходных оценок // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 3. С. 575–581. Doi: 10.25559/SITITO.16.202003.575-58.
4. Бондаренко, П. Н. Структурная организация устройств с актуализацией состояний во времени // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 4. С. 7–11.
5. Коршунов Г. И., Петрушевская А. А. Обеспечение качества продукции в интеллектуальных производствах электроники // Контроль качества продукции. 2021. № 8. С. 43–46.
6. Ломакин М. А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженер. вестн. Дона. 2014. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/issue/112> (дата обращения: 12.12.2022).
7. Крылов А. А., Корниук Д. В. Технологические подходы к устранению дрейфа нуля микромеханических гироскопов // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2018. № 5. С. 93–97.
8. Мещеряков Я. Е. Нивелирование дрейфа МЭМС-гироскопа // Электронные средства и системы управления: Материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. № 1-2. С. 53–55.
9. Последовательный интерфейс SPI (3-wire) // Рынок микроэлектроники: справочник по электронным компонентам. URL: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/interface/spi/index.htm> (дата обращения: 15.12.2022).

## REFERENCES

1. Sergushov I. V., Ermakov R. V., Ulyanina Yu. A., Seranova A. A., Lvov A. A., Skripal E. N. Analysis of error sources for the navigation system of a small unmanned aerial vehicle. Proceedings of the International symposium “Reliability and quality”. 2018, vol. 2, pp. 53–57. (In Russ.).
2. Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance. IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 1986, vol. AES-22, is. 6, pp. 803–805. Doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310815>.
3. Ponyatsky V. M., Zenov B. V. Sensor fusion in case of aliquant sample repetition frequencies of measurements and output estimates. Modern information technologies and IT-education. 2020;16(3):575–581. (In Russ.). Doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202003.575-581>.
4. Bondarenko P. N. Structure of setup device with state actuation in time. News of SPbSEU “LETI”. 2016;(4):7–12. (In Russ.).
5. Korshunov G. I., Petrushevskaya A. A. Product quality assurance in intelligent electronics manufacturing. Product quality control. 2021;(8):43–46. (In Russ.).
6. Lomakin M. A. Features of building an error model for MEMS sensors in solving a navigation task. Don engineering gazette. 2014;(2):84. (In Russ.). Available from: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/issue/112> [Accessed 12 December 2022].
7. Krylov A. A., Korniyuk D. V. Technological approaches to eliminating zero drift of micromechanical gyroscopes. News of Tula State University. Technical science. 2018;(5):93–97. (In Russ.).
8. Meshcheryakov Ya. E. Leveling the MEMS gyroscope drift. Electronic means and control systems. Materials of reports of the International scientific and practical conference. 2017, no. 1-2, pp. 53–55. (In Russ.).
9. Microelectronics market: a guide to electronic components. Serial interface SPI (3-wire). Available from: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/interface/spi/index.htm> [Accessed 15 December 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Макаров Егор Дмитриевич**, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством в сложных системах, системы управления.

Поступила в редакцию 02.02.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

**Makarov Egor D.**, Postgraduate at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management in complex systems, control systems.

Received 02.02.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Исследование динамических характеристик в вычислительных сетях с червячной коммутацией

**Александр Александрович Карандашев<sup>1</sup>**

aleksandr.karandashev@guap.ru, orcid.org/0000-0002-0358-0165

**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.** Рассматривается проблема изучения динамических характеристик информационных потоков. Производится оценка актуальности исследований и разработок, рассматриваются последние достижения и работы в области проектирования и изучения характеристик различных сетей. Ставится цель определения динамических характеристик информационных потоков в беступиковых маршрутах вычислительных сетей с червячной коммутацией. Краткий обзор технологии червячной коммутации и беступиковой маршрутизации помогает детальнее рассмотреть предлагаемую для изучения область. Описываются основные механизмы, достоинства и области применения рассматриваемой технологии. Предлагается набор характеристик для изменения параметров беступиковых маршрутов в сетях с червячной коммутацией. Каждая из них подробно описывается. Для практических исследований предлагаются три сетевые топологии. Для исследования используются результаты теории сетей и теории систем управления.

**Ключевые слова:** червячная коммутация, динамика, сети, характеристики, маршруты

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2020-0004, «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств».

**Для цитирования:** Карандашев А. А., Оленев В. Л. Исследование динамических характеристик в вычислительных сетях с червячной коммутацией // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 36–44. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-36-44.

Original article

## Investigation of dynamic characteristics in computer networks with wormhole networks

**Aleksandr A. Karandashev<sup>1</sup>**

aleksandr.karandashev@guap.ru, orcid.org/0000-0002-0358-0165

**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.** Current paper deals with the problem of studying the dynamic characteristics of information flows. The relevance of research and development is assessed, the latest achievements and work in the field of design and study of the characteristics of various networks are considered. The purpose of the paper is to determine the dynamic characteristics of information flows in deadlock-free routes of computer networks with wormhole routing. A brief overview of the technology of wormhole routing and deadlock-free routing helps to consider in more detail the area proposed for study. The main mechanisms, advantages and areas of application of the considered technology are described. A set of characteristics is proposed for changing the parameters of deadlock-free routes in networks with wormhole routing. Each of them is described in detail. Three network topologies are proposed for practical research. For the study, the results of the theory of networks and the theory of control systems are used.

**Keywords:** wormhole routing, dynamics, networks, characteristics, routes

**Acknowledgements.** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. FSRF-2020-0004, «Scientific foundations for the construction of architectures and communication systems for on-board information and computing systems of a new generation for aviation, space systems and unmanned vehicles».

**For citation:** Karandashev A. A., Olenev V. L. Investigation of dynamic characteristics in computer networks with wormhole networks. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(2):36–44. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-36-44.

## Введение

В настоящее время построение вычислительных сетей различного масштаба является востребованной и актуальной задачей [1–4]. Это прежде всего связано с высокой степенью цифровизации всех аспектов современной жизни человека. Компьютерные сети стали частью современной жизни и используются для решения различных типов задач. Среди них можно выделить как узкоспециализированные сети по управлению атомными станциями и бортовой аппаратурой, так и широко распространенные частные и корпоративные сети. Некоторые из таких сетей проектируются специально для решения конкретной задачи и обеспечения необходимых параметров пропускной способности, надежности и времени передачи данных.

Целью статьи является определение динамических характеристик информационных потоков в беступиковых маршрутах вычислительных сетей с червячной коммутацией. Для исследования используются результаты теории сетей и теории систем управления.

## Актуальность исследования

В 2015 г. К. Камареро с группой соавторов в своей статье [5] предложили использовать проективные сети, основанные на обобщенных графах Мура, для обеспечения равномерной загрузки сетевой структуры. Данный подход предлагался как альтернатива ранее разработанному подходу *Slim Fly*, решавшему рассматриваемую проблему недостаточно эффективно.

Однако существуют и другие сети, которые являются хаотично наращиваемыми и постоянно развивающимися, такие как интернет. Тем не менее, для всех типов вычислительных сетей необходимо производить оценку характеристик, чтобы выявлять проблемные места, своевременно обнаруживать сбои и исправлять их, не нарушая передачу информации в остальной части сети. Так, в одном из исследований В. Ю. Семенова в 2014 г. были определены необходимые для мониторинга параметры больших вычислительных сетей и рассматривалась проблема автоматизации процесса принятия решений при анализе данных мониторинга крупномасштабных вычислительных систем [6]. Согласно этому исследованию, современная система мониторинга должна отвечать шести требованиям, среди которых масштабируемость, переносимость и распределенность.

В 2020 г. Р. Фану с группой коллег исследовали влияние прокладки нового подводного кабеля, соединяющего Африку с Южной Америкой, на

задержки при передаче данных в интернете [7]. В результате был предложен новый метод для изучения функционирования сети при изменении ее структуры.

Как видно, актуальность оценки работы вычислительных сетей была подтверждена множеством различных исследований и не угасающим интересом научного сообщества. За последние пять лет большое внимание было уделено темам, связанным с анализом социальных сетей. Например, в 2018 г. в статье М. Кордейро были представлены современные проблемы изменяющихся сетей, стоящие перед исследователями [8]. Авторы отмечают, что широко распространенными задачами являются не только проблемы изучения крупных мобильных, телекоммуникационных сетей и интернета, но и проблемы анализа новостей и блогов, обнаружения событий в социальных сетях. Согласно наукометрическому исследованию, проведенному в статье Д. Камачо, на 2020 г. уже существовало около двадцати различных средств анализа социальных сетей [9]. Возникла потребность в определении и оценке различных параметров исследования сетей. Автор не только определяет сами параметры и оценивает по ним каждое программное средство, но и предлагает четыре вопроса в качестве отправной точки для дальнейших исследований.

Другим актуальным направлением исследования является анализ параметров больших сетей систем массового обслуживания. Согласно статье Э. Эберта [10], на начало 2020 г. особое внимание уделялось исследованиям, направленным на разработку новых методов моделирования подобных систем. В своей статье автор представляет новый метод моделирования систем массового обслуживания произвольной сложности: обслуживания с параллельными, тандемными и разветвленными или объединенными топологиями.

В том же году вышла статья исследователя Р. Т. Вонга, посвященная вопросам проектирования современных телекоммуникационных сетей [11]. В ней рассматривалась проблема прогнозирования трафика и разработки гибких и устойчивых сетевых структур. Решение задач стратегического планирования, где преобладают риск и неопределенность, целочисленное программирование (классическая оптимизация) не является подходящим инструментом проектирования сети. Вместо этого для задач, где пространство решений не слишком велико, авторы предлагали такие методы, как моделирование и анализ решений. Текущая инженерная практика для интернета (например, маршрутизация по кратчайшему пути и избыточное выделение ресурсов) подчеркивает необходимость простоты и гибко-

сти для того, чтобы приспособиться к неопределенности постоянно меняющегося ландшафта услуг и технологий. Цена такого подхода – сеть с избыточной пропускной способностью. Авторы подчеркивали актуальность рассматриваемой темы в современном мире и предлагали новые направления исследований для оптимизации сети, которые используют новые технологические достижения, усовершенствованные сетевые политики и эволюцию технических стандартов (например, возможность перехода от распределенной к централизованной структуре управления).

Отдельное внимание за последние пять лет было уделено анализу крупных сетевых протоколов передачи данных, таких как IPv4, IPv6, Wi-Fi и др. [12–15]. Кроме того, велись активные исследования в областях кибербезопасности и искусственного интеллекта для анализа сетевой структуры и трафика [16–21].

Таким образом, исследование и оценка работы вычислительных сетей действительно являются востребованными и актуальными задачами [22–27]. Однако, если наиболее известные протоколы и сети передачи данных уже активно исследуются, то узкоспециализированные технологии все еще нуждаются во внимании научного сообщества. Примером такой технологии среди сетей передачи данных можно назвать сети с червячной коммутацией.

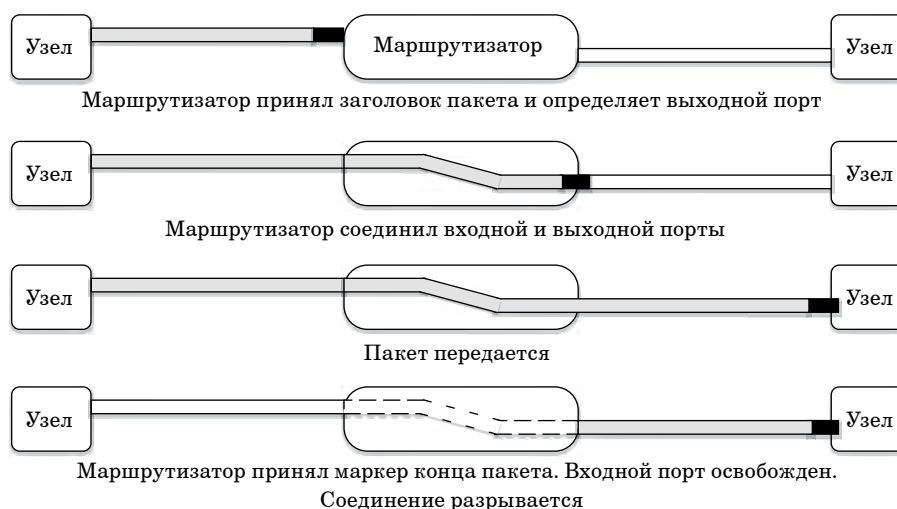
### Червячная коммутация и беступиковая маршрутизация

Для сетей с червячной коммутацией характерен способ маршрутизации пакетов с данными без промежуточной буферизации. При таком

способе пакет, передающийся между узлами сети, не требует больших буферов в коммутаторах. Коммутатор в подобной системе, получив новый пакет, смотрит, какой выходной порт требуется для передачи, и, если он свободен, пакет сразу же направляется в него. В противном случае входной порт, на который приходит пакет, блокируется. Блокировка пакета продлится до тех пор, пока нужный порт для передачи вновь не будет свободен. Из-за рассмотренных особенностей передачи маршрутизация с червячной коммутацией также называется маршрутизацией «на лету».

При использовании рассматриваемого подхода скорость передачи данных увеличивается по сравнению с маршрутизацией, которая использует промежуточную буферизацию передаваемых пакетов с данными. При промежуточной буферизации принимаемый пакет сначала должен быть полностью записан в буфер коммутатора, после чего будет определен выходной порт. Если выходной порт свободен, то пакет передается дальше. Если же необходимый выходной порт занят, то прием по входному порту приостанавливается.

Пример передачи пакета данных в простейшей сети с червячной коммутацией показан на рис. 1. В сети расположены два узла – один передает данные, другой их принимает. Связующим звеном служит маршрутизатор. В рассматриваемом примере выходной порт свободен, поскольку больше нет устройств, которые могли бы его использовать. Поэтому после штатной проверки выходного порта при помощи заголовка пакета, отмеченного на рисунке черным цветом, маршрутизатор сразу же переправляет заголовок и данные, отмеченные серым, в выходной канал. После передачи порты маршрутизатора освобождаются.



• Рис. 1. Схема работы сети с червячной коммутацией  
• Fig. 1. Scheme of operation of a network with wormhole routing

Червячная коммутация позволяет увеличить производительность сети и понизить стоимость оборудования, что способствует распространению подобного метода маршрутизации.

Беступиковая маршрутизация накладывает ограничения на возможные маршруты в сети передачи данных. Под тупиком понимается ситуация, когда заголовок пакета блокируется из-за того, что следующий канал занят передачей этого же пакета. Так же тупиком считается ситуация, когда несколько пакетов взаимно блокируют друг друга. В таком случае каждый пакет упирается в занятый другим пакетом виртуальный канал.

Отсутствие циклических зависимостей является необходимым и достаточным условием детерминированной беступиковой маршрутизации [28]. В сетях с червячной коммутацией особенно важно избегать блокировок типа «тупик» при передаче данных, поскольку пакеты не буферизируются и занимают весь канал на пути своего следования по размеру передаваемого пакета. Подобные сети часто используются там, где необходима быстрая и надежная передача данных [29]. В подобных дорогостоящих системах критически важно, чтобы данные не застревали в сети при передаче, приводя к сбоям при работе всей системы.

### Динамические характеристики маршрутов в сетях с червячной коммутацией

Для построения устойчивой модели сетевого оборудования предлагается оценивать динамику каждого отдельного маршрута при помощи динамических характеристик: весовой и переходной [30, 31].

Под весовой характеристикой понимается выходной сигнал динамической системы как реакция системы на  $\Delta$ -функцию при нулевых

начальных условиях. Пример входного сигнала и весовой характеристики представлены на рис. 2. Поведение весовой характеристики предстоит получить в приближенном значении на практике. Будет считаться, что на вход объекта подана  $\Delta$ -функция, если время действия импульса будет намного меньше времени переходного процесса. Весовая характеристика как обратное преобразование Лапласа может быть представлена формулой (1):

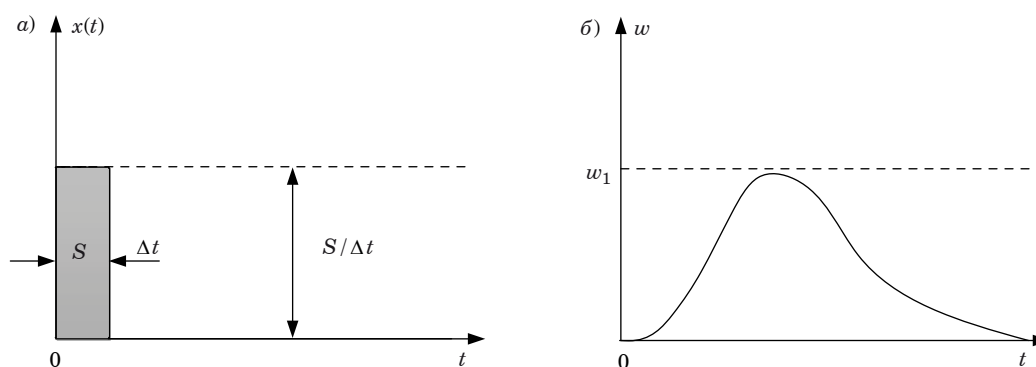
$$h(t) = L^{-1}(W(s) \cdot 1). \quad (1)$$

Под переходной характеристикой понимается выходной сигнал динамической системы как реакция системы на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях. Подобным единичным воздействием может быть событие передачи одного пакета, где величина сигнала прямо пропорционально зависит от величины передаваемого пакета или же события сбоя при передаче информации. Переходная характеристика как обратное преобразование Лапласа может быть представлена формулой (2):

$$v(t) = L^{-1}\left(W(s) \cdot \frac{1}{s}\right). \quad (2)$$

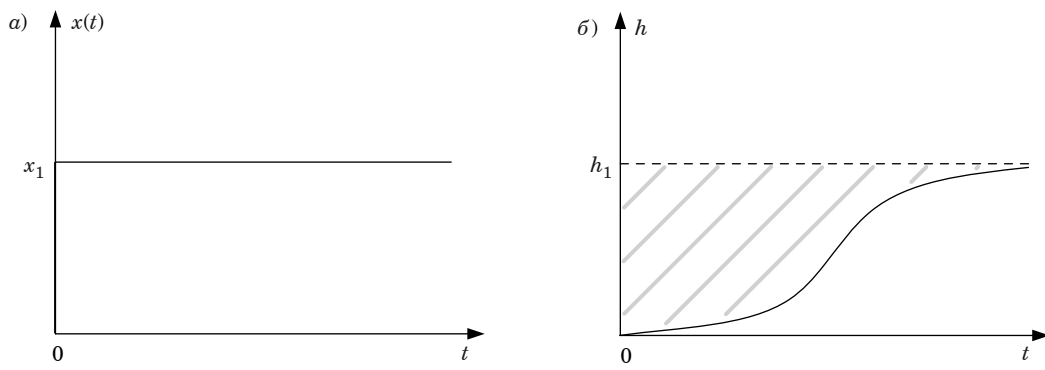
Примеры входного единичного импульса и переходной характеристики представлены на рис. 3. Поведение кривой в реальных условиях предстоит определить на практике при помощи специализированного программного обеспечения по моделированию сетей с червячной коммутацией.

Другим параметром для анализа может послужить передаточная функция. Определение передаточной функции для каждого моделируемого маршрута позволит характеризовать динамику объекта по каналу, связывающему конкретный вход объекта с конкретным выходом, поскольку она определяется только внутренними свойствами

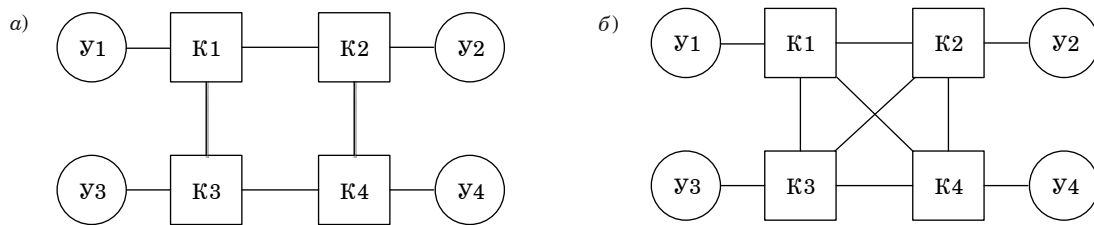


• Рис. 2. Весовая характеристика для маршрута: а – дельта-функция; б – весовая характеристика  
• Fig. 2. Weight characteristic for the route: а – delta-function; б – weight characteristic

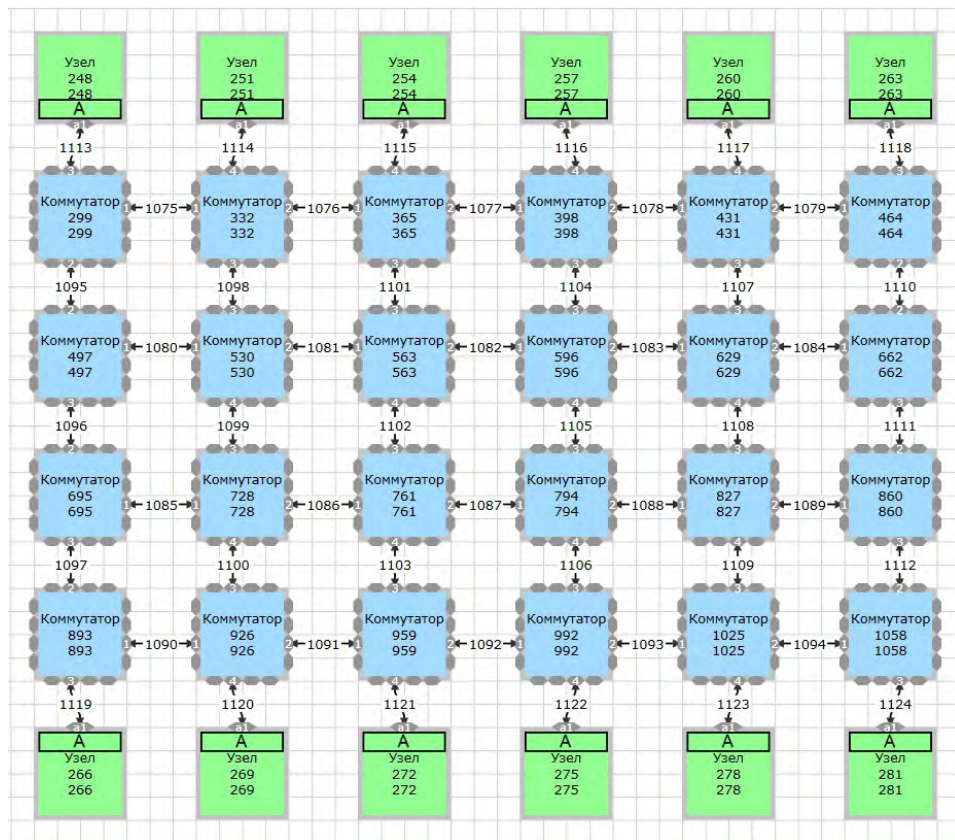




- *Рис. 3. Переходная характеристика для события передачи одного пакета: а – единичный импульс; б – переходная характеристика*
- *Fig. 3. Transient response for a single packet transmission event: a – single pulse; б – transient response*



- *Рис. 4. Схемы двух вычислительных сетей с дуплексными каналами: а – топология «кольцо»; б – полностью связанная топология*
- *Fig. 4. Diagrams of two computer networks with duplex channels: a – ring topology; б – fully connected topology*



- *Рис. 5. Схема вычислительной сети, построенной в SANDS*
- *Fig. 5. Scheme of a computer network built in SANDS*

системы, является функцией комплексного переменного, выражаемой в виде формулы (3):

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)}. \quad (3)$$

Согласно определению, передаточной функцией называется отношение преобразованного по Лапласу выхода объекта  $y(s)$  к преобразованному по Лапласу входу  $x(s)$  при нулевых начальных условиях.

Предлагаемые к рассмотрению динамические характеристики маршрутов информационных потоков в вычислительных сетях с червячной коммутацией следует рассчитать как на классических небольших сетевых структурах, так и на сложных сетевых топологиях, моделируемых при помощи специального программного обеспечения SANDS [32]. Предлагаемые к рассмотрению сети представлены на рис. 4; 5. На рис. 4 узлы сети, представляющие собой вычислительные устройства, которые обмениваются данными, представлены кругами У1–У4, а маршрутизирующие коммутаторы представлены квадратами К1–К4.

Схемы, изображенные на рис. 4, могут помочь детально рассмотреть построение беступикового маршрута и изучить, как влияет добавление в сетевую структуру двух дополнительных каналов связи на создание беступикового маршрута, как именно изменяются их весовая и переходная характеристики. Схема, показанная на рис. 5, поможет изучить работу сети при больших вычислительных нагрузках и сложной топологии. Представляется интересным рассмотреть, как именно меняются указанные характеристики информационного потока при большой конкуренции за ограниченные ресурсы. Можно будет не только оценить характеристики маршрутов, но и сделать выводы о стабильности передачи дан-

ных и устойчивости предлагаемых беступиковых маршрутов.

## Заключение

В результате проведенной работы была рассмотрена актуальность исследования проектирования и изучения характеристик различных вычислительных сетей. Была поставлена цель по определению динамических характеристик информационных потоков в беступиковых маршрутах вычислительных сетей с червячной коммутацией.

Отдельно кратко рассмотрены технология червячной коммутации и принципы беступиковой маршрутизации, позволяющие подробнее вникнуть в особенности исследуемой проблематики. В результате исследования были предложены динамические характеристики информационных потоков, подлежащие изучению в сетях с червячной коммутацией:

- весовая характеристика;
- переходная характеристика;
- передаточная функция.

Каждая из них была подробно описана. Также в статье предложены три схемы сетей, на которых необходимо провести моделирование по передаче данных по беступиковым маршрутам. Благодаря двум небольшим сетевым топологиям можно рассмотреть влияние полновязности сетевой структуры на передачу данных и изменение определенных в статье динамических характеристик для каждого рассматриваемого информационного потока. Предлагаемая же крупная сетевая топология позволит изучить предлагаемые динамические характеристики в условиях повышенной нагрузки и высокой конкуренции за ограниченные сетевые ресурсы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Decentralized and dynamic topology emulation / P. Gouveia [et al.] // EuroSys '20: Fifteenth EuroSys conference. 2020. P. 1–9.
2. Mukul K. Evolution of routers // International journal of advanced research in science, communication and technology. 2021. P. 510–518. Doi: 10.48175/IJARSCT-1284.
3. Method for estimating the convergence parameters of dynamic routing protocols in computer networks / H. Osukhivska [et al.] // IEEE 16<sup>th</sup> International conference on computer sciences and information technologies (CSIT). 2021. P. 228–231.
4. Route-based dynamics modeling and tracking with application to air traffic surveillance / X. Linfeng, Y. Liang, Z. Duan, G. Zhou // IEEE transactions on intelligent transportation systems. 2020. Vol. 21. P. 209–221.
5. Projective networks: topologies for large parallel computer systems / C. Camarero, C. Martínez, E. Vallejo, R. Beivide // IEEE transactions on parallel and distributed systems. 2017. Vol. 28. P. 2003–2016.
6. Семенов В. Ю. Исследование и анализ средств и методов мониторинга вычислительных сетей // Решетневские чтения. 2014. С. 328–330.

7. Unintended consequences: effects of submarine cable deployment on Internet routing / R. Fanou, B. Huffaker, R. Mok, K. C. Claffy // *Passive and active measurement*. 2020. P. 211–227.
8. Evolving networks and social network analysis methods and techniques / M. Cordeiro, R. P. Sarmiento, P. Brazdil, J. Gama // *Social media and journalism – trends, connections, implications*. 2018. P. 101–134.
9. The four dimensions of social network analysis: an overview of research methods, applications, and software tools / D. Camacho [et al.] // *Information fusion*. 2020. № 63. P. 88–120.
10. Computationally efficient simulation of queues: The R package queue computer / A. Ebert, P. Wu, K. Mengersen, F. Ruggeri // *Journal of statistical software*. 2020. Vol. 95, № 5. P. 1–29.
11. Wong R. T. Telecommunications network design: Technology impacts and future directions // *Networks*. 2021. Vol. 7, № 2. P. 205–224.
12. Evaluation of theoretical interference estimation metrics for dense Wi-Fi networks / K. S. Manas [et al.] // *International conference on COMMunication systems & NETworks (COMSNETS)*. 2021. P. 351–359.
13. Sochor T., Sochorova H. Dynamic routing protocol convergence in simulated and real IPv4 and IPv6 networks // *Cybernetics and automation control theory methods in intelligent algorithms. Proceedings of 8<sup>th</sup> computer science online conference – 2019*. 2019. Vol. 3. P. 117–126.
14. Al-Ani D. R., Al-Ani A. R. The performance of IPv4 and IPv6 in terms of routing protocols using GNS 3 simulator // *Procedia computer science*. 2018. № 130. P. 1051–1056.
15. Bolanowski M., Byczek T. Measure and compare the convergence time of network routing protocols // *ITM Web of Conferences*. 2018. № 21 (1). P. 1–9.
16. Biyun Ch., Zhou H. Real-time identification of false data injection attacks: a novel dynamic-static parallel state estimation based mechanism // *IEEE*. Access 7. 2019. P. 95812–95824.
17. Sungmoon K., Yoo H., Shon T. IEEE 1815. 1-based power system security with bidirectional RNN-based network anomalous attack detection for cyber-physical system // *IEEE*. Access 8. 2020. P. 77572–77586.
18. Optimized graph convolution recurrent neural network for traffic prediction / K. Guo [et al.] // *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 2020. P. 1–12.
19. Traffic forecasting based on integration of adaptive subgraph reformulation and spatio-temporal deep learning model / X. Shi-Yuan [et al.] // *Electronics*. 2022. № 11 (6). P. 1–13.
20. Bonniot L. Computer network modeling and root cause analysis with statistical learning // *Université Rennes*. № 1. 2021. P. 1–173.
21. Xiao G. Analysis on the influence of artificial intelligence in computer network technology // *2<sup>nd</sup> International conference on intelligent systems research and mechatronics engineering (ISRME – 2019)*. 2019. P. 437–440.
22. Pond T. C. Measuring and modeling information flow on social networks // *Graduate college dissertations and theses*. 2020. 81 p.
23. Exploring the spatiotemporal evolution and sustainable driving factors of information flow network: a public search attention perspective / F. Ma [et al.] // *International journal of environmental research and public health*. 2022. № 19 (1). P. 1–25.
24. Лесько С. А., Жуков Д. О., Истратов Л. А. Модели описания динамики блокировки узлов вычислительных сетей вирусами на основе использования перколяционных кинетических и стохастических методов // *Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2020. № 52. С. 22–32.
25. Markov model of unsteady profile of normal behavior of network objects of computer systems / I. Tereikovskiy [et al.] // *CMiGIN*. 2019. P. 1–13.
26. BGP beacons, network tomography, and bayesian computation to locate route flap damping / C. Gray [et al.] // *IMC '20: ACM Internet measurement conference*. 2020. P. 1–14.
27. Evstafiev V. V., Rudenko N. V. Improving the dynamics of information flows for optimizing telecommunication systems // *IOP conference series: Materials science and engineering*. 2021. Vol. 1029 (1). 2021. P. 1–11.
28. Duato J. A necessary and sufficient condition for deadlock-free adaptive routing in wormhole networks // *International conference on parallel processing*. 1994. Vol. 1. P. 142–149. Doi: 10.1109/ICPP.1994.36.
29. Karandashev A. A., Olenev V. L. Selection methods for deadlock-free routes' optimal configuration in on-board SpaceWire Networks // *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. IEEE. 2021. P. 1–8.
30. Бритов Г. С. Метод тестового диагностирования линейных динамических систем // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 1. С. 77–85.
31. Бритов Г. С. Бизнес-процесс тестового диагностирования линейных динамических систем на основе передаточных функций // *Системный анализ и логистика*. 2016. Вып. 12. С. 4–11.
32. SANDS tool for design and simulation of onboard networks / V. Olenev, I. Korobkov, N. Chumakova, N. Sinyov // *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. 2021. P. 1–10.

## REFERENCES

1. Gouveia P., Neves J., Segarra C. et al. Decentralized and dynamic topology emulation. Conference: EuroSys '20: Fifteenth EuroSys conference. 2020, pp. 1–9.
2. Mukul K. Evolution of routers. International journal of advanced research in science, communication and technology. 2021, pp. 510–518. Doi: 10.48175/IJARSCT-1284.
3. Osukhivska H., Tysh I., Lobur T., Shylinska I., Lupenko S. Method for estimating the convergence parameters of dynamic routing protocols in computer networks. IEEE 16<sup>th</sup> International conference on computer sciences and information technologies (CSIT). 2021, pp. 228–231.
4. Linfeng X., Liang Y., Duan Z., Zhou G. Route-based dynamics modeling and tracking with application to air traffic surveillance. IEEE transactions on intelligent transportation systems. 2020, vol. 21, pp. 209–221.
5. Camarero C., Martínez C., Vallejo E., Beivide R. Projective networks: topologies for large parallel computer systems. IEEE transactions on parallel and distributed systems. 2017, vol. 28, pp. 2003–2016.
6. Semenov V. Yu. Research and analysis of means and methods for monitoring computer networks. Reshetnevskiy readings. 2014, pp. 328–330. (In Russ.).
7. Fanou R., Huffaker B., Mok R., Claffy K. C. Unintended consequences: effects of submarine cable deployment on Internet routing. Passive and Active Measurement. March 2020. 2020, pp. 211–227.
8. Cordeiro M., Sarmiento R. P., Brazdil P., Gama J. Evolving networks and social network analysis methods and techniques. Social media and journalism – trends, connections, implications. 2018, pp. 101–134.
9. Camacho D., Lledot A. P., Orgaz G. B., Gonzalez-Pardo A., Cambria E. The four dimensions of social network analysis: an overview of research methods, applications, and software tools. Information fusion. 2020;(63):88–120.
10. Ebert A., Wu P., Mengersen K., Ruggeri F. Computationally efficient simulation of queues: The R package queue computer. Journal of statistical software. 2020;95(5):1–29.
11. Wong R. T. Telecommunications network design: Technology impacts and future directions. Networks. 2021;77(2): 205–224.
12. Manas K. S., Sathya V., Seah W., Yamaguchi H., Higashino T. Evaluation of theoretical interference estimation metrics for dense Wi-Fi networks. International conference on COMMunication systems & NETWORKS (COMSNETS). 2021, pp. 351–359.
13. Sochor T., Sochorova H. Dynamic routing protocol convergence in simulated and real IPv4 and IPv6 networks. Proceedings of 8<sup>th</sup> computer science on-line conference – 2019. 2019, vol. 3, pp. 117–126.
14. Al-Ani D. R., Al-Ani A. R. The performance of IPv4 and IPv6 in terms of routing protocols using GNS 3 simulator. Procedia computer science. 2018;(130):1051–1056.
15. Bolanowski M., Byczek T. Measure and compare the convergence time of network routing protocols. ITM web of conferences. 2018; no. 21(1), pp. 1–9.
16. Biyun Ch., Zhou H. Real-time identification of false data injection attacks: a novel dynamic-static parallel state estimation based mechanism. IEEE. Access 7. 2019, pp. 95812–95824.
17. Sungmoon K., Yoo H., Shon T. IEEE 1815. 1-based power system security with bidirectional RNN-based network anomalous attack detection for cyber-physical system. IEEE. Access 8. 2020, pp. 77572–77586.
18. Guo K., Hu Y., Qian Z. et al. Optimized graph convolution recurrent neural network for traffic prediction. IEEE transactions on intelligent transportation systems. 2020, vol. 22, pp. 1–12.
19. Shi-Yuan H., Sun Q., Zhao Q., Han R., Chen Y. Traffic forecasting based on integration of adaptive subgraph reformulation and spatio-temporal deep learning model. Electronics. 2022;(11(6)):1–13.
20. Bonniot L. Computer network modeling and root cause analysis with statistical learning. Université Rennes. 2021;(1): 1–173.
21. Xiao G. Analysis on the influence of artificial intelligence in computer network technology. 2<sup>nd</sup> International conference on intelligent systems research and mechatronics engineering (ISRME – 2019). 2019, pp. 437–440.
22. Pond T. C. Measuring and modeling information flow on social networks. Graduate college dissertations and theses. 2020. 81 p.
23. Ma F., Zhu Y., Yuen K. F., et al. Exploring the spatiotemporal evolution and sustainable driving factors of information flow network: a public search attention perspective. International journal of environmental research and public health. 2022;19(1):1–25.
24. Lesko S. A., Zhukov D. O., Istratov L. A. Models for describing the dynamics of blocking computer network nodes by viruses based on the use of percolation kinetic and stochastic methods. Vestn. Tomsk. State University. Management, computer engineering and informatics. 2020;(52):22–32. (In Russ.).
25. Tereikovskiy I., Tereikovska L., Mussiraliyeva Sh., Tsiutsiura M., Achkoski Ju. Markov model of unsteady profile of normal behavior of network objects of computer systems. CMiGIN. 2019, pp. 1–13. (In Russ.).

26. Gray C., Mosig C., Bush R., et al. BGP beacons, network tomography, and bayesian computation to locate route flap damping. IMC '20: ACM Internet measurement conference. 2020, pp. 1–14.
27. Evstafiev V. V., Rudenko N. V. Improving the dynamics of information flows for optimizing telecommunication systems. IOP conference series: Materials science and engineering. 2021;1029(1):1–11.
28. Duato J. A necessary and sufficient condition for deadlock-free adaptive routing in wormhole networks. International conference on parallel processing 1994, vol. 1, pp. 142–149. Doi: 10.1109/ICPP.1994.36.
29. Karandashev A. A., Olenev V. L. Selection methods for deadlock-free routes' optimal configuration in on-board SpaceWire Networks. Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). IEEE. 2021, pp. 1–8. (In Russ.).
30. Britov G. S. Method of test diagnostics of linear dynamic systems. Information and control systems. 2015;(1):77–85. (In Russ.).
31. Britov G. S. Business process of test diagnostics of linear dynamic systems based on transfer functions. System analysis and logistics. 2016. Is. 12, pp. 4–11. (In Russ.).
32. Olenev V., Korobkov I., Chumakova N., Sinyov N. SANDS tool for design and simulation of onboard networks. Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). 2021, pp. 1–10.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Карандашев Александр Александрович**, аспирант, ассистент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, инженер лаборатории встроенных и компьютерных технологий для мобильных коммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – бортовые сети, беступиковые маршруты, конфигурации маршрутов, протоколы передачи, моделирование, алгоритмы на графах.

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

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

**Karandashev Aleksandr A.**, Postgraduate Student, Assistant at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, Engineer at the Laboratory of Embedded and Computer Technologies for Mobile Communications, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – on-board networks, deadlock-free routes, route configurations, transmission protocols, modeling, graph algorithms.

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

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

Поступила в редакцию 10.10.2022

Поступила после рецензирования 24.10.2022

Принята к публикации 28.02.2023

Received 10.10.2022

Revised 24.10.2022

Accepted 28.02.2023

## Метод нелинейной оптимальной спектрально-финитной фильтрации навигационных сигналов в условиях априорной неопределенности

Юрий Павлович Иванов<sup>1</sup>

✉ ypi35@mail.ru (upi@mail.ru), orcid.org/0000-0001-9872-6544

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

**Аннотация.** В работе рассматривается метод оптимальной нелинейной фильтрации дискретных сигналов на основе использования спектрально-финитного представления оцениваемого сигнала и принципа максимального правдоподобия на фоне аддитивных с одномодальным законом распределения помех измерения для широкого класса моделей измерения и сигналов.

**Ключевые слова:** оптимальная нелинейная оценка, спектрально-финитное представление сигнала, разложение Карунена – Лозва, принцип максимального правдоподобия

**Для цитирования:** Иванов Ю. П. Метод нелинейной оптимальной спектрально-финитной фильтрации навигационных сигналов в условиях априорной неопределенности // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 45–51. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-45-51.

Original article

## The method of nonlinear optimal spectral-finite filtering of navigation signals under conditions of a priori uncertainty

Yuriy P. Ivanov<sup>1</sup>

✉ ypi35@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

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

**Abstract.** The paper considers a method of optimal nonlinear filtering of discrete signals based on the use of a spectral-finite representation of the estimated signal and the maximum likelihood principle against the background of additive with a single-modal distribution law of measurement interference for a wide class of measurement models and signals.

**Keywords:** optimal nonlinear estimation, spectral-finite representation of the signal, Karunen – Loev decomposition, maximum likelihood principle

**For citation:** Ivanov Yu. P. The method of nonlinear optimal spectral-finite filtering of navigation signals under conditions of a priori uncertainty. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):45–51. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-45-51.

### Введение

Как известно [1, 2], если апостериорная плотность распределения оцениваемого сигнала не является унимодальной и симметричной, оптимальную по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценку в классе всевозможных статистик необходимо искать в классе нелинейных методов обработки результатов измерений.

Наилучшей нелинейной оценкой в классе всех оценок по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценки в соответствии с теоремой Дуба [1] является условное математическое ожидание оцениваемого сигнала относительно результатов

измерений. В настоящее время в связи со сложностью получения и реализации оптимальных нелинейных алгоритмов фильтрации разработано множество приближенных (квазиоптимальных) методов оценки сигнала.

Из разработанных методов наиболее востребованными являются нелинейные оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы фильтрации марковских сигналов [3–5]. Эти алгоритмы основаны на нахождении алгоритмов в виде симметризованных стохастических дифференциальных и рекуррентных уравнений относительно апостериорных плотностей распределения в случае коррелированных и некоррелирован-

ных помех измерения. Аналитическое решение указанных алгоритмов весьма затруднительно, что приводит к нахождению многочисленных квазиоптимальных алгоритмов на основе параметризации апостериорных плотностей распределения. Такие алгоритмы базируются на использовании разложения нелинейных функций оцениваемого сигнала, коэффициентов сноса и диффузии в ряды Тейлора в окрестности получаемых оценок или на гауссовской аппроксимации законов распределения с определением эквивалентных моментов распределения и затем использования обобщенных алгоритмов фильтра Калмана – Бьюси и других, обеспечивающих требуемый компромисс между точностью оценивания и объемом вычислительных затрат [3–7]. Общие недостатки таких алгоритмов заключаются в их сложности и в использовании приближенных оценок качества полученных результатов фильтрации сигналов, и в отсутствии универсальности рассматриваемых методов относительно моделей оцениваемых сигналов и помех измерения.

### Описание рассматриваемого метода

В данной работе рассматривается достаточно простой универсальный метод нелинейной оптимальной оценки в общем случае не марковских и не гауссовских дискретных сигналов на основе использования спектрально-финитного представления сигнала и принципа максимального правдоподобия при обеспечении эффективной точности полученных оценок в условиях знания только корреляционной функции оцениваемого сигнала при незначительной методической ошибке оценки.

Рассматривается следующая модель измерения:

$$Y_i = \varphi_i(X_i) + H_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $Y_i, X_i, H_i$  – произвольные скалярные случайные последовательности, в общем случае не марковские, не гауссовские нестационарные коррелированные процессы, определяющие соответственно результаты измерения, оцениваемый сигнал и погрешность измерения. Из законов распределения в данной работе предполагается, что помеха распределения имеет одномодальную плотность распределения, к которой относится и гауссовская плотность распределения. Известны также корреляционная функция полезного сигнала  $Kx(t_1, t_2)$ , которая является положительно-определенной, и помехи измерения  $Kh(t_1, t_2)$ ,

систематическая ошибка помехи измерения  $\delta h_i$  и математическое ожидание  $M[X_i] = 0$ .

Ограничения, связанные со скалярностью рассматриваемых процессов и математическим ожиданием сигнала, равным нулю, не являются принципиальными и рассматриваются для упрощения изложения метода.

Функция  $\varphi_i[\ ]$ , в общем случае, является нелинейной и взаимно-однозначной на скользящем финитном интервале времени  $T$ .

Образует векторный сигнал

$$\mathbf{S}_i = \|X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1}\|^T,$$

где  $r$  – число дискретов, характеризующих память устройства обработки результатов измерений;  $T$  – знак транспортирования. Матрицу корреляционных моментов в  $i$  момент времени, соответствующую случайному вектору  $\mathbf{S}_i$ , можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{Ks}_i = \begin{pmatrix} \sigma x^2_i, Kx(i \cdot d, (i-1) \cdot d), \dots, \\ Kx(id, (i-r+1) \cdot d) \\ Kx((i-1) \cdot d, i \cdot d), \sigma x^2_{i-1}, \dots, \\ Kx((i-1) \cdot d, (i-r+1) \cdot d) \\ \dots \\ Kx(i-r+1) \cdot d, i \cdot d, Kx(i-r+1) \cdot d, \\ (i-1) \cdot d, \dots, \sigma x^2_{i-r+1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\sigma x^2_{i-k}, k = 0, 1, \dots, i-r+1$  – дисперсия сигнала  $X_{i=k}$  в  $(i-k)$ -й момент времени;  $Kx((i-k) \cdot d, (i-j) \cdot d), j = i, i-1, \dots, i-r+1$  – взаимный корреляционный момент сигналов в  $(i-k)$ -й и  $(i-j)$ -й дискретные моменты времени.

Пусть  $T = r \cdot d$ , где  $d$  – величина дискрета. Пусть  $\mathbf{DDs}_i$  – вектор размерности  $r \times 1$ , упорядоченных по убыванию величин собственных значений  $DD_i^j$  матрицы  $\mathbf{Ks}_i$  в  $i$ -й момент времени,  $j = 1, 2, \dots, r$ ;  $\mathbf{BBs}_i$  – матрица размерности  $r \times r$  собственных векторов матрицы  $\mathbf{Ks}_i$  на  $i$ -м шаге оценки сигналов, соответствующих  $r$  собственным числам. Столбец матрицы  $\mathbf{BBs}_i^j$  с индексом  $j$  соответствует собственному значению  $DD_i^j, j = 1, 2, \dots, r$ . Величина  $T$  определяет финитный интервал времени, на котором временной сигнал преобразуется в финитное спектральное разложение.

Матрица  $\mathbf{Ks}_i$ -размерности  $r \times r$  для вещественного процесса является симметричной и по заданию положительно определенной. Определим собственные векторы и числа матрицы  $\mathbf{Ks}_i$ . В данном случае это равносильно найти разложение Карунена – Лоэва для вектора  $\mathbf{S}_i$  [8, 9].

Основная цель использования спектрально-временной оценки сигналов заключается в эффективном сжатии информации при спектральном преобразовании наблюдаемых сигналов. При этом наиболее эффективным спектральным представлением сигнала на финитном дискретном интервале времени является использование представления сигнала рядом Карунена – Лозва [9, 10]. Этот ряд обладает важными свойствами, к которым можно отнести следующие:

1) ряд Карунена – Лозва является частным случаем разложения Фурье, поэтому обладает всеми достоинствами этих рядов;

2) ряд Карунена – Лозва имеет наилучшую сходимость в среднеквадратичном смысле из всех рядов Фурье;

3) коэффициенты разложения, т. е. спектральные компоненты Карунена – Лозва являются некоррелированными случайными величинами, а при нормальном законе распределения сигнала и независимыми, что значительно упрощает анализ и синтез линейных информационно-измерительных систем;

4) при положительно определенной корреляционной функции оцениваемого сигнала собственные функции разложения образуют полный ортогональный или ортонормальный ряд, а сумма собственных значений есть значение энергии процесса на выбранном интервале, и их значения определяют дисперсии спектральных компонент разложения.

Как известно [10], разложение Карунена – Лозва на финитном дискретном интервале, содержащем  $r$  отчетов, имеет конечное число  $r$  спектральных компонент и определяется  $r$  собственными числами и собственными функциями корреляционной  $\mathbf{Ks}_i$  матрицы размерности  $r \times r$  вещественного временного ряда.

Используя стандартные процедуры, определим собственные числа и собственные векторы матрицы  $\mathbf{Ks}_i$ , определяемой соотношением (2).

Например, в программном продукте *Mathcad-15* определение упорядоченных собственных значений матрицы  $\mathbf{Ks}_i$  можно осуществить с помощью оператора «reverse(eigenvals( $\mathbf{Ks}_i$ ))», а матрицу упорядоченных собственных векторов с помощью оператора «reverse[(eigenvecs( $\mathbf{Ks}_i$ ))<sup>T</sup>]<sup>T</sup>».

Учитывая, что для практически используемых оцениваемых сигналов собственные упорядоченные по величине числа матриц корреляционных матриц моментов временных рядов  $X_i$  характеризуются тем, что первое значение значительно превосходит остальные, без заметной потери качества оценки сигналов в дальнейшем целесообразно из набора  $r$  компонент учитывать одну-две компоненты. Это равносильно тому, что энергия

сигнала, определяемого дисперсией и длительностью интервала времени, на котором осуществляется спектральное представление сигнала, в основном содержится в первой и уже на порядок меньше во второй и других спектральных компонентах. Ограничение количества учитываемых компонент при оценке наблюдаемых сигналов эквивалентно также предварительной низкочастотной фильтрации, так как при этом исчезают высокочастотные компоненты. Является ли учитываемое число спектральных компонент допустимым с точки зрения требуемого качества фильтрации сигналов, легко проверяется соотношениями для оценки качества спектрально-финитной обработки информации, приведенной ниже.

Выбор величины используемых компонент разложения Карунена – Лозва  $j$  можно осуществить путем сравнения энергии оцениваемого сигнала на интервале разложения с используемой в процессе оценки долей энергии сигнала, определяемой значением  $j$ . Введем показатель выбора  $j$ , учитывающий используемую долю энергии сигнала в обработке информации, в виде следующего соотношения:

$$\min_{j_i} R_i^{j_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j_i} DD_i^j}{\sum_{j=1}^r DD_i^j} \geq R_i^{\text{TP}},$$

где  $R_i^{\text{TP}}$  – требуемое значение показателя для предварительного выбора величины  $j$ , определяющего потерю точности обработки в связи с неполным использованием энергии оцениваемого сигнала. На выбор величины  $j$  влияет также мощность помехи, определяемая дисперсией  $DH_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  отфильтрованной собственными векторами разложения Карунена – Лозва. Окончательную оценку значения  $j$  можно произвести по результатам оценки качества фильтрации сигнала. В данной работе выберем  $j = 1$ , так как первая спектральная компонента для обычно используемых корреляционных функций и интервалов времени содержит до 95 % и более энергии сигнала на выбранном интервале времени и одновременно значительно упрощает алгоритм нелинейной фильтрации сигналов.

Рассмотрим оценку максимального правдоподобия для следующей модели измерения:

$$Z_i = \Phi \mathbf{1}_i ((\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_1) + \mathbf{H}\mathbf{1}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где векторы размерности  $r \times 1$  определяются следующими соотношениями:



$$\begin{aligned} \mathbf{H}\mathbf{1}_i &= \|H_i, H_{i-1}, \dots, H_{i-r+1}\|; \\ \boldsymbol{\Phi}\mathbf{1}_i[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)] &= \\ &= \left\| \begin{array}{l} \varphi_i[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_0], \varphi_{i-1}[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_1], \dots, \\ \varphi_{i-r+1}[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_{r-1}] \end{array} \right\|^T, \end{aligned} \quad (4)$$

$c_i$  – значение первого спектрального коэффициента разложения Карунена – Лоэва, величина которого не меняется на интервале разложения и лежит в диапазоне значений  $-4\sqrt{DD_i^1} \leq c_i \leq 4\sqrt{DD_i^1}$  с вероятностью большей 0,995, если оцениваемый процесс  $X_i$  гауссовский,  $\sqrt{DD_i^1}$  – среднеквадратическое значение первого спектрального коэффициента  $c_i$  разложения Карунена – Лоэва,  $\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1$  – первый столбец матрицы собственных векторов  $\mathbf{B}\mathbf{B}_i$ , который определяет значения оценок фильтрации и интерполяции сигнала  $X_i$ .

$\hat{X}_i = (\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_1$  – оценка сигнала  $X_i$  в  $i$ -й момент времени, точность которой определяется методической ошибкой за счет использования в спектральном разложении только первой компоненты разложения Карунена – Лоэва.

Оценка максимального правдоподобия  $\hat{c}_{i,м.п}^*$  первого спектрального коэффициента разложения Карунена – Лоэва вектора  $\mathbf{S}_i$  по результатам наблюдения сигнала  $\mathbf{Y}\mathbf{1}_i = \|Y_i, Y_{i-1}, \dots, Y_{i-r+1}\|$ , определяется из следующего соотношения [11]:

$$\hat{c}_{i,м.п}^* = \underset{c}{\max} \{f(\mathbf{z}_i / c_i)\}, \quad (5)$$

где условную плотность распределения коэффициента  $c_i$  при использовании ее в виде нормальной в  $i$ -й момент времени можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{z}_i / c_i) &= \frac{1}{(2\pi)^2 |\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i|_2^{\frac{1}{2}}} \times \\ &\times \exp\{-\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\Phi}\mathbf{1}_i(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i) - \boldsymbol{\delta}\mathbf{h}\mathbf{1}_i\}^T \times \\ &\times \mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i^{-1} \cdot [\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\Phi}\mathbf{1}_i(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i) - \boldsymbol{\delta}\mathbf{h}\mathbf{1}_i]_2^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $|\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}|$  – определитель матрицы корреляционных моментов вектора  $\mathbf{H}\mathbf{1}_i$  в  $i$ -й момент времени;  $\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i^{-1}$  – обратная матрица корреляционных моментов вектора  $\mathbf{H}\mathbf{1}_i = \|H_i, H_{i-1}, \dots, H_{i-r+1}\|$  в  $i$ -й момент времени;  $\boldsymbol{\delta}\mathbf{h}\mathbf{1}_i = \|\delta h_{1i}, \delta h_{1i-1}, \dots, \delta h_{1i-r+1}\|^T$  – вектор размерности  $r \times 1$  систематических погрешностей помехи измерения.

В случае, когда плотность распределения  $f(\mathbf{z}_i / c_i)$  затруднительно определить, можно принять во внимание то, что при использовании нормальной плотности распределения обеспечи-

вается максимальная энтропия и тем самым мы получаем оценку снизу [11].

Матрицу  $\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i$ -размерности  $r \times r$  корреляционных моментов компонент вектора  $\mathbf{H}\mathbf{1}_i$  можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i = \left\| \begin{array}{l} \sigma h_i^2, Kh(i \cdot d, (i+1) \cdot d), \dots, \\ Kh(id, (i-r+1) \cdot d) \\ Kh((i+1) \cdot d, i \cdot d), \sigma h_i^2, \dots, \\ Kh((i+1) \cdot d, (i-r+1) \cdot d) \\ \dots \\ Kh((i-r+1) \cdot d, i \cdot d), Kh((i-r+1) \cdot d, \\ (i-1) \cdot d), \dots, \sigma h_i^2 \end{array} \right\|, \quad (7)$$

где  $\sigma h_i^2$  – дисперсия помехи  $H_i$  в  $i$ -й момент времени;  $Kh((i-k) \cdot d, (i-j) \cdot d)$ ,  $j = i, i-1, \dots, i-r+1$  – взаимный корреляционный момент помехи измерения в  $(i-k)$ -й и  $(i-j)$ -й дискретные моменты времени. В некоторых частных случаях можно решить аналитически уравнение (6), в частности, когда функция  $\boldsymbol{\Phi}\mathbf{1}_i[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_1]$  линейная и не зависит от  $i$ . При нахождении максимума в соотношении (6) изменение величины  $c_i$  целесообразно осуществлять с дискретностью в выбранном диапазоне  $\Delta c \leq (0,1 - 0,3)\sqrt{DD_i^1}$ . В том случае когда случайная дискретная последовательность  $H_i$  является белым гауссовским дискретным стационарным шумом, матрица  $\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}_i$  будет иметь диагональный вид, а нелинейное функциональное преобразование  $\boldsymbol{\Phi}\mathbf{1}_i[(\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)]$  и систематическая помеха не зависят от времени, соотношение (6) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \hat{c}_{i,м.п}^* &= \underset{c}{\max} \left\{ \frac{1}{(2\pi)^2 |\mathbf{K}\mathbf{h}\mathbf{1}|_2^{\frac{1}{2}}} \times \right. \\ &\times \exp\left\{ - \sum_{j=i-r+1}^i \frac{[Y_j - (\boldsymbol{\Phi}\mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot c_i)_1] - \delta h}{2\sigma h^2} \right\} \left. \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценку максимального правдоподобия сигнала  $\mathbf{S}_i$  по результатам оценки первого коэффициента спектрального представления сигнала  $\mathbf{S}_i$  можно представить в виде соотношения

$$\hat{\mathbf{S}}_{i,м.п}^* = \mathbf{B}\mathbf{B}_i^1 \cdot \hat{c}_{i,м.п}^*. \quad (9)$$

Вектор  $\hat{\mathbf{S}}_{i,м.п}^*$  размерности  $r \times 1$  содержит в качестве первой компоненты оптимальную оценку  $\hat{X}_{i,м.п}^*$  максимального правдоподобия сигнала  $X_i$  при использовании только первой спектральной компоненты разложения сигнала в дискретный ряд Карунена – Лоэва. Остальные  $r-1$  компоненты вектора  $\hat{\mathbf{S}}_{i,м.п}^*$  содержат интерполированные

оценки вектора  $\mathbf{S}_i$ , т. е.  $(X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_{i-r+1})$ . Таким образом, оценка фильтрации максимального правдоподобия сигнала  $X_i$  в  $i$ -й момент времени при использовании только первой спектральной компоненты разложения сигнала в дискретный ряд Карунена – Лоэва равна

$$\hat{X}_{i, \text{м.п.}}^* = (\hat{\mathbf{S}}_{i, \text{м.п.}}^*)_1. \quad (10)$$

### Оценка качества метода максимального правдоподобия

Как известно [12], нижняя граница условной дисперсии ошибки скалярной оценки первого коэффициента разложения Карунена – Лоэва, полученная при использовании принципа максимального правдоподобия, в исследуемом случае может быть получена из соотношения Крамера – Рао на основе использования информационной матрицы Фишера в виде следующей корреляционной матрицы:

$$\begin{aligned} D_{ei, \text{м.п.}} &\leq [\mathbf{I} + \nabla_{c_i} \delta \mathbf{h}_i(c_i)^T] \times \\ &\times M\{\nabla_{c_i} f(\mathbf{z}_i / c_i) \times \nabla_{c_i}^T f(\mathbf{z}_i / c_i)\}^{-1} \times \\ &\times [\mathbf{I} + \nabla_{c_i} \delta \mathbf{h}_i(c_i)^T]^T, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица размерности  $r \times r$ ;  $\nabla_{c_i}$  – градиент в виде столбца размерности  $r \times 1$ .

Решение уравнения (11) позволяет определить нижнюю границу качества оценки  $\hat{c}_{i, \text{м.п.}}^*$ . В случае нормального закона распределения  $f(\mathbf{z}_i / c_i)$  оценка качества оценки не представляет затруднений.

### Дополнительные методы повышения качества оценки на основе принципа максимального правдоподобия

Точность оценки  $\hat{c}_{i, \text{м.п.}}^*$  может быть повышена за счет использования априорной информации о корреляционной функции оцениваемого сигнала  $X_i$  на основе использования оператора линейной оптимальной оценки, определяемого теоремой ортогонального проецирования [13] или в случае марковского сигнала  $X_i$  использованием фильтрации Калмана, что позволит найти оптимальную оценку в классе линейных оценок, даже если оцениваемый сигнал не является гауссовским. Оптимальная спектрально-финитная линейная оценка определяется следующим соотношением:

$$\hat{c}_i^* = A c_i^* \cdot \hat{c}_{i, \text{м.п.}}^*, \quad (12)$$

где  $\hat{c}_i^*$  – оптимальная оценка первого коэффициента разложения Карунена – Лоэва по критерию дисперсии ошибки оценки с учетом априорной информации о его дисперсии в виде первого собственного числа  $DD_i^1$  в  $i$ -й момент времени;  $A c_i^*$  – оператор оптимальной линейной финитно-временной оценки первой компоненты спектрального разложения по критерию дисперсии ошибки оценки, в  $i$ -й момент времени определяется соотношением [13]:

$$A c_i^* = DD_i^1 (DD_i^1 + D_{ei, \text{м.п.}})^{-1}. \quad (13)$$

Выражение для оптимальной оценки  $\hat{X}_i^*$  сигнала  $X_i$  в  $i$ -й момент времени можно определить в следующем виде:

$$\hat{X}_i^* = (\mathbf{B} \mathbf{B}^1 \cdot \hat{c}_i^*)_1. \quad (14)$$

### Пример использования рассматриваемого алгоритма для получения нелинейной оптимальной оценки сигнала

Пусть модель измерения определяется соотношением (1), где нелинейное взаимно-однозначное преобразование представляется в следующем виде:

$$\varphi_i(X_i)_i = (X_i)^3,$$

где  $X_i$  – гауссовский марковский стационарный дискретный сигнал, корреляционная функция которого  $Kx_{i,j} = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha|i-j|d}$ ,  $\sigma = 1$ ,  $\alpha = 0,01$  1/с, что характерно для навигационных сигналов летательных аппаратов, дискрет  $d = 4$ с, удовлетворяющий требованию теоремы В. А. Котельникова [10], дискретный интервал разложения сигнала в ряд Карунена – Лоэва,  $r = 5$ . Моделью помехи  $H_i$  выбран белый гауссовский стационарный шум, дисперсия которого  $\sigma h^2 = 1$ . Распределение собственных чисел, упорядоченных по значениям, разложения Карунена – Лоэва, соответствующих корреляционной матрице, определяемой соотношением (2) и исходными данными, примера равно

$$\mathbf{D} \mathbf{D} \mathbf{s} = \|4,696; 0,194; 0,057; 0,03; 0,022\|^T,$$

где первое собственное число  $DD^1 = 4,696$  определяет 95,2 % энергии сигнала на рассматриваемом интервале времени.

Матрица собственных векторов разложения Карунена – Лоэва применительно к исходным данным данным равна

$$\mathbf{BBs} = \begin{pmatrix} 0,44 & 0,599 & -0,517 & -0,376 & 0,198 \\ 0,51 & 0,376 & 0,188 & 0,599 & -0,511 \\ 0,454 & 0 & 0,629 & 1,482 \cdot 10^{-14} & 0,631 \\ 0,451 & -0,376 & 0,188 & -0,599 & -0,511 \\ 0,44 & -0,599 & -0,517 & 0,376 & 0,198 \end{pmatrix}.$$

Первый столбец матрицы  $\mathbf{BBs}^{(1)}$  определяет первую базисную компоненту, которая соответствует первому собственному числу  $DD^1 = 4,696$  и является наиболее низкочастотной из компонент базиса Карунена – Лоэва. Дисперсия ошибки нелинейной оценки максимального правдоподобия  $\hat{X}_{i,м.п.}^*$ , определяемая по соотношениям (9) и (10), статистически найденная усреднением по выборке объемом  $n = 2000$ , равна  $D_{эм.п} = 0,422$ . Таким образом, эффективность нелинейной фильтрации на основе спектрально-финитного подхода и принципа максимального правдоподобия равна

$$\gamma_{м.п} = \frac{\sigma h^2}{D_{эм.п}}, \quad \gamma_{м.п} = 2,37. \quad \text{Если использовать до-}$$

полнительно оптимальную линейную обработку полученной оценки максимального правдоподобия в соответствии с соотношениями (12) и (13), определяющими оптимальную финитно-временную оценку, то дисперсия ошибки оценки  $\hat{X}_i^*$  будет равна  $D_{эф.в} = 0,374$ , а эффективность общей

$$\text{фильтрации равна } \gamma_{эф.в} = \frac{\sigma h^2}{D_{эф.в}}, \quad \gamma_{эф.в} = 2,674.$$

Если использовать в качестве дополнительной обработки информации фильтрацию Калмана,

то дисперсия ошибки оценки в этом случае будет равна  $\sigma_{к.ф}^2 = 0,347$ , а эффективность общей обработки результатов измерений  $Y_i$  равна  $\gamma_{ф.к} = \frac{\sigma h^2}{D_{эф.к}}, \quad \gamma_{ф.к} = 2,882$ . Увеличение эффек-

тивности фильтрации Калмана по отношению к финитно-временной оценке связана с тем, что используемая память на результаты измерения  $Y_i$  у финитно-временной оценки была выбрана  $r = 5$ , в то время как в случае фильтрации Калмана используется память для обработки результатов измерения от первого до текущего момента времени  $i$ .

## Заключение

В работе представлен метод нелинейной оптимальной аналитической фильтрации дискретных сигналов, основанный на использовании спектрально-финитного представления сигнала и принципа максимального правдоподобия, для широкого класса в общем случае не марковских, не гауссовских моделей оцениваемого сигнала на фоне аддитивных с одномодальным законом распределения помех измерения. Метод фильтрации сигналов отличается простотой алгоритма, достаточно высокой точностью оценки при использовании дополнительного преобразования полученных оценок линейным оптимальным оператором, полученным на основе теоремы ортогонального проецирования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов Ю. П., Сняжков А. Н., Филатов И. В. Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Л.: Машиностроение, 1984. 208 с.
2. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 495 с.
3. Стратонович Р. Л. Применение теории процессов Маркова для оптимальной фильтрации сигналов // Радиотехника и электроника. 1960. № 1. С. 1751–1763.
4. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов М.: Сов. радио, 1978. 320 с.
5. Синицин И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева. М.: Логос, 2006. 636 с.
6. Шахтарин Б. И. О нелинейных оптимальных и квазиоптимальных фильтрах Стратоновича // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 1. С. 1325–1336.
7. Ярлыков М. С. Применение марковской теории нелинейной оптимальной фильтрации в радиотехнике. М.: Сов. радио, 1980. 380 с.
8. Перов В. П. Прикладная спектральная теория оценивания. М.: Наука, ГРФМЛ, 1982. С. 431.
9. Иванов Ю. П. Спектрально-финитный метод оптимальной линейной фильтрации сигналов: Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Первая Междунар. научн. конф. 14–22 апр. 2020. 2020. С. 35–42.
10. Иванов Ю. П., Бирюков Б. Л. Информационно-статистическая теория измерений. Модели сигналов и анализ точности систем: учеб. пособие. СПб., 2008. С. 160.
11. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.

12. *Иванов Ю. П., Никитин В. Г.* Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных систем, критерии оптимизации и свойства оценок: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2011. 101 с.
13. *Иванов Ю. П.* Фinitно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 5. С. 23–28.

## REFERENCES

1. Ivanov Yu. P., Sinyakov A. N., Filatov I. V. Integration of information and measuring devices of aircraft. Leningrad: Mechanical Engineering; 1984. 208 p. (In Russ.).
2. Sage E., Mels J. Theory of evaluation and its application in communication and control. Moscow: Communication; 1976. 495 p. (In Russ.).
3. Stratonovich R. L. Application of the theory of Markov processes for optimal signal filtering. Radio engineering and electronics. 1960;(1):1751–1763. (In Russ.).
4. Sosulin Yu. G. Theory of detection and evaluation of stochastic signals. Moscow: Soviet radio; 1978. 320 p. (In Russ.).
5. Sinitsin I. N. Kalman and Pugachev filters. Moscow: Logos; 2006. 636 p. (In Russ.).
6. Shakhtarin B. I. On nonlinear optimal and quasi-optimal Stratonovich filters. Radio engineering and electronics. 2006;51(1):1325–1336. (In Russ.).
7. Labels M. S. Application of the Markov theory of nonlinear optimal filtration in radio engineering. Moscow: Soviet radio; 1980. 380 p. (In Russ.).
8. Perov V. P. Applied spectral theory of estimation. Moscow: Science, GRFML; 1982. 431 p. (In Russ.).
9. Ivanov Yu. P. Spectral-finite method of optimal linear filtration of signalsю Aerospace instrumentation and operational technologies: First International scientific conference. 14–22 April 2020. 2020, pp. 35–42. (In Russ.).
10. Ivanov Yu. P., Biryukov B. L. Information and statistical measurement theory of signal models and systems accuracy analysis: textbook. SPb.; 2008. 160 p. (In Russ.).
11. Repin V. G., Tartakovsky G. P. Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems. Moscow: Soviet Radio; 1977. 432 p. (In Russ.).
12. Ivanov Yu. P., Nikitin V. G. Information and statistical theory of measurements. Methods of optimal synthesis of information and measurement systems, optimization criteria and evaluation properties: study guide. SPb.: SUAI; 2011. 101 p. (In Russ.).
13. Ivanov Yu. P. The finite-time method of optimal filtering of discrete signals. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2018;(5):23–28. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Иванов Юрий Павлович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптимальная обработка сигналов информационно-измерительных систем на основе фinitно-временного и спектрально-фinitного подходов, разработка методологии оптимальных оценок априорной, апостериорной и безусловной достоверностей принимаемых решений в процессах контроля состояний приборных комплексов и безопасности полета летательных аппаратов.

Поступила в редакцию 10.10.2022

Поступила после рецензирования 24.10.2022

Принята к публикации 28.02.2023

**Ivanov Yuri P.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optimal signal processing of information and measurement systems based on finite-time and spectral-finite approaches, development of a methodology for optimal assessments of a priori, a posteriori and unconditional reliability of decisions made in the processes of monitoring the states of instrument complexes and flight safety of aircraft.

Received 10.10.2022

Revised 24.10.2022

Accepted 28.02.2023

Научная статья  
УДК 004.942

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-52-63

## Разработка методов получения прикладной имитационной модели бортовой сети на основе ее формального описания

Николай Иванович Синёв<sup>1</sup>

nikolay.sinyov@guap.ru, orcid.org/0000-0001-8421-4791

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.** Рассматриваются существующие подходы к разработке, тестированию и верификации современных бортовых протоколов и показан прототип программного обеспечения, которое на основе формальной модели сети создает прикладную модель. На основе анализа существующих решений сформированы требования к программному обеспечению, которое должно осуществлять данный переход. Сформулированы проблемы, которые планируется решить в ходе дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** бортовые сети, коммуникационные протоколы, SystemC, сеть Петри, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Синёв Н. И., Оленев В. Л. Разработка методов получения прикладной имитационной модели бортовой сети на основе ее формального описания // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 52–63. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-52-63.

Original article

## Development of methods for obtaining an applied simulation model of the onboard network based on its formal description

Nikolay I. Sinyov<sup>1</sup>

nikolay.sinyov@guap.ru, orcid.org/0000-0001-8421-4791

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, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The development, testing and verification of modern on-board protocols is a very knowledge-intensive task. It is necessary to develop a different range of models for each stage of new standard development to decide finally to verify and validate the new protocol. All this requires a lot of time. To reduce the development time, it is necessary to optimize the process of preparing the models. To do this it is necessary to transform the formal model of the new standard into an applied one. In this article the existing approaches will be considered and the prototype of software, which on the basis of formal network model creates an applied network model, will be shown.

**Keywords:** on-board networks, communication protocols, SystemC, Petri net, simulation modeling

**For citation:** Sinyov N. I., Olenev V. L. Development of methods for obtaining an applied simulation model of the onboard network based on its formal description. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):52–63. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-52-63.

### Введение

Разработка, тестирование и верификация современных бортовых протоколов является очень наукоемкой задачей. Кроме времени, которое затрачивается на разработку нового стандарта, также много сил уходит на валидацию и верификацию. Для решения этих задач разработчикам необходимо спроектировать формальные (сети Петри [1]), имитационные (программа с применением SystemC [2]) и физиче-

ские (железные устройства) модели для создаваемого стандарта.

Разработка каждой такой модели требует подготовленной команды людей, которые имеют определенные компетенции в каждой из областей. На каждую из этих моделей затрачивается большое количество человеко-часов, которые занимают львиную долю всего времени разработки. Разработчики всегда хотят оптимизировать свою нагрузку и как можно скорее закончить проект. А что если можно оптимизировать две из трех

моделей? Этого можно добиться путем трансформации построенной формальной модели в прикладную через специальную программу-конвертор. Данный подход в два раза сократил бы время разработки и тестирования формальных и прикладных (имитационных) моделей и уменьшил затраты на разработку.

В данной статье рассматриваются существующие решения, подходы и первые наброски программы, которая на основе формальной модели сети Петри создает прикладную модель сети с использованием SystemC.

## Существующие решения

### MAS-CommonKADS

MAS-CommonKADS – это методология разработки агентно-ориентированного программного обеспечения или модели (агентно-ориентированная система – АОС), предназначенная для применения на этапах анализа и проектирования. Она является гибридом методологии инженерии знаний CommonKADS [3], объектно-ориентированной методологии «Техника объектного моделирования» (Object Modelling Technique – OMT), объектно-ориентированной инженерии программного обеспечения (Object-oriented Software Engineering – OOSE) и метода проектирования, получившего название «Проектирование, управляемое ответственностью» (Responsibility Driven Design – RDD). В жизненном цикле разработки

системы в рамках данной методологии выделяется ряд этапов:

– *этап концептуализации* предполагает получение первичного описания решаемой проблемы посредством создания набора диаграмм использования. Результат может быть представлен и в виде текстового описания системы;

– на *этапе анализа* определяются функциональные требования к системе. Система описывается через определенный набор моделей;

– на *этапе проектирования* могут использоваться как нисходящий, так и восходящий подходы, проводится определение повторно используемых компонентов и компонентов, которые следует разработать в зависимости от целевой платформы. На входе этого этапа применяются модели, полученные на этапе анализа, а на выходе – набор спецификаций, готовый к реализации;

– на *этапе разработки и тестирования* производится кодирование и тестирование агентов, модели которых получены на ранних стадиях. Внедрение и эксплуатация системы происходят на этапе использования.

В рамках методологии определены следующие модели (рис. 1).

Агентная модель описывает возможности агентов к рассуждению, наличие сенсоров и эффектов, предоставляемые сервисы, объединение агентов в группы и иерархии.

Модель задач формализует цели существования, декомпозицию целей, методы решения проблем.



• Рис. 1. Взаимодействие моделей в методологии MAS-CommonKADS  
 • Fig. 1. Interaction of models in the MAS-CommonKADS methodology

Экспертная модель определяет, какие знания необходимы агентам для достижения поставленных целей.

Организационная модель описывает организацию, в которой предстоит работать АОС, а также социальную организацию агентного сообщества.

Координационная модель описывает переговоры агентов при их взаимодействии и используемые протоколы.

Коммуникационная модель описывает взаимодействие человека с разрабатываемым программным обеспечением, а также факторы, влияющие на проектирование пользовательского интерфейса.

Проектная модель объединяет все предыдущие модели и состоит из трех подмоделей. Первая подмодель – это проект сети, где происходит проектирование соответствующих аспектов агентной инфраструктуры (необходимая сеть, знания и средства обработки и передачи данных). Вторая подмодель представляет агентное проектирование, служащее для разделения или объединения агентов, полученных на ранних этапах на основании соображений целесообразности и выбора подходящей архитектуры для каждого агента. Третья подмодель – платформозависимое проектирование, где происходит определение платформы разработки агентов для каждой из выбранных архитектур.

Основным отличием этой методологии от других является то, что разрабатываемая АОС рассматривается с различных точек зрения. Разработчик получает описание, позволяющее выполнять реализацию на различных программных платформах. Сильной стороной методологии принято считать использование стандартных методов инженерии программного обеспечения, которые расширяются естественным способом. MAS-CommonKADS создавалась в расчете на многократное использование материалов, полученных на каждом уровне проектирования, что дает возможность использования данных из других проектов. Главный недостаток этой методологии – слабая поддержка этапов проектирования, тестирования и кодирования.

### Прикладные MAS

В работах В. А. Виттиха [4], П. О. Скобелева и С. В. Батищева предложена методика создания прикладных открытых MAS (MAS, англ. Multi-agent system – многоагентная система) на основе концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей). Данная методика поддержана развитыми инструментальными средствами и обеспечивает эффективную реализацию прикладных

MAS в рамках заявленной концепции. Однако она ориентирована на сравнительно узкий класс систем промышленной логистики и агентную модель, описывающую конкуренцию за ресурсы.

В качестве наглядного примера того, как теоретические модели MAS могут быть доведены до практического использования, можно привести деятельность Института проблем управления сложными системами РАН и НПК «Генезис знаний» (г. Самара), которые являются лидерами практического использования АОС в области государственного управления и в социальной сфере.

### Coq

Coq – инструмент интерактивного доказательства теорем [5], позволяющий формализовать математические концепции, а затем помогающий в интерактивном режиме генерировать проверенные на машине доказательства теорем. Машинная проверка дает пользователям гораздо больше уверенности в правильности доказательств по сравнению с доказательствами, созданными и проверенными людьми. Coq использовался в ряде флагманских проектов верификации, в том числе в компиляторе C, верифицированном CompCert, и служил для проверки доказательства теоремы о четырех цветах (среди многих других математических формализаций).

Пользователи генерируют доказательства, вводя серию тактик, составляющих этапы доказательства. Существует множество встроенных тактик, некоторые из которых являются элементарными, а другие реализуют сложные процедуры принятия решений (например `lia`, процедура принятия решений для линейной целочисленной арифметики). Еще одна встроенная тактика – `Ltac` и его запланированная замена, `Ltac2`, предоставляют языки для определения новых тактик, комбинируя существующие тактики с циклами и условными конструкциями. Они позволяют автоматизировать большие части доказательств, а иногда и целые доказательства. Кроме того, пользователи могут добавлять новые тактики или функциональные возможности, создавая плагины Coq с помощью OCaml.

Ядро Coq [6] выполняет окончательную проверку правильности доказательства, сгенерированного тактикой. Обычно это доказательство действительно правильное, но делегирование проверки доказательства ядру означает, что даже если тактика ошибочна, она не сможет ввести в систему неверное доказательство.

Наконец, Coq также поддерживает извлечение проверенных программ в такие языки программирования, как OCaml и Haskell. Это позволяет эффективно выполнять код Coq и может исполь-

зоваться для создания проверенных программных библиотек.

### SpGraph and Spark

Spark [7] – это унифицированный аналитический движок для обработки больших данных. Для него разработан GraphX – модуль обработки графов Spark, который служит для обработки графических данных, например, графа социальной сети, состоящего из более чем одного миллиарда людей и сотни миллиардов дружеских связей. GraphX, если сравнивать с другими системами (Pregel, GraphLab и Gemini), является наиболее популярным благодаря следующим возможностям:

- он совместим и широко используется с системами MapReduce/Hadoop [7];
- приложения, разработанные на основе Spark, работают годами. GraphX позволяет без нарушения работы этих приложений обрабатывать огромные массивы данных в режиме реального времени.

### Lean

Lean – это средство для доказательства теорем и язык программирования [8], основанный на исчислении конструкций с индуктивными типами. Это проект с открытым исходным кодом, размещенный на GitHub. Он был запущен Леонардо де Моура из *Microsoft Research* в 2013 г. Lean имеет интерфейс, который отличает его от других интерактивных средств доказательства теорем, может быть скомпилирован в JavaScript и доступен в веб-браузере. Он имеет встроенную поддержку символов Unicode (их можно набирать с помощью LaTeX-подобных последовательностей, таких как «times» для «×»). Lean также имеет обширную поддержку метапрограммирования.

Функции, которые выполняет язык Lean:

- вывод типа;
  - первоклассные функции;
  - мощные типы данных;
  - сопоставление с образцом;
  - типовые классы;
  - расширяемый синтаксис;
  - макросы по визуальной обработке кода;
  - зависимые типы;
  - фреймворк метапрограммирования;
  - многопоточность.
- самоверификация: возможность доказать собственные функции на языке Lean.

### Сравнение подходов

Для реализации собственного решения при проектировании бортовых сетей необходимо

сравнить и проанализировать существующие на рынке варианты с целью выбора наиболее подходящего подхода, который можно будет применить для разрабатываемого программного обеспечения.

Многоагентные системы могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы. Примерами таких задач являются онлайн-торговля, ликвидация чрезвычайных ситуаций и моделирование социальных структур. Многоагентные системы обучаются на основе моделей мира, поведения человека, биржевых операций, работы физики и многого другого. Переход от формальных моделей к физическим является основной идеей машинного обучения.

В MAS-CommonKADS применяются модели, полученные на этапе анализа, а на выходе – получаем набор спецификаций, готовых к реализации. Данный идейный подход хорошо описывает цель работы, однако такие системы не были внедрены в разработку бортовых систем методом перехода от графов к программной реализации.

Прикладные MAS работают похожим образом и могут быть доведены до практического использования. MAS модели ориентированы на сравнительно узкий класс систем промышленной логистики и агентную модель, описывающую конкуренцию за ресурсы. Поэтому метод не полностью удовлетворяет целям данной работы.

Инструмент интерактивного доказательства теорем – программное обеспечение, помогающее исследователю в разработке формальных доказательств в процессе взаимодействия человека с машиной. Как правило, такое программное обеспечение включает в себя какую-то разновидность интерактивного редактора доказательств или другой интерфейс, с помощью которого человек может вести поиск доказательств, сведения о которых хранятся в компьютере, а также процедуры автоматической проверки доказательств, осуществляемые компьютером.

На основе языка Coq пользователь может формализовать математические методы, решения и доказательства, а затем проверять и модифицировать полученные от программы интерактивные представления. Таким образом, рассматриваемое ПО удовлетворяет задачам поставленной работы, но все же данный язык программирования работает лишь на математических представлениях, а не на структуре сетевых технологий.

Spark и SpGraph могут применяться для доказательства математических теорем. Они оперируют данными в виде графов, что сильно корре-



лирует с одной из целей работы – с сетью Петри, которая в свою очередь так же является графом.

Lean кроссплатформенен – работает на ОС Windows, Linux, IOS, Android. Существуют также вариации на Raspberry Pi. Помимо этого, он позволяет от формальной модели получить математические доказательства. Реализован на языке C++, так что наиболее вероятно может подойти для решения поставленной в статье задачи.

Проведя сравнение и рассмотрев методы перехода от формальных моделей к прикладным (табл. 1), можно сделать вывод о том, что ни один из подходов не предназначен для работы с сетями. Это значит, что напрямую использовать один из методов для разрабатываемой модели невозможно. Выделим частные характеристики рассмотренных подходов и составим требования для решения поставленной задачи.

1. Поддержка C++. Проект разрабатывается с применением C++ фреймворка SystemC, поэтому использование данного языка необходимо для реализации прикладной модели.

2. Работа с графами. Сеть Петри является ориентированным мультиграфом, поэтому необходимо использовать методы, позволяющие работать в области математической абстракции.

3. Работа с сетевыми протоколами. Для реализации бортовой сети, которая передает данные между устройствами, необходимо использовать сетевые протоколы или протоколы бортовых сетей.

## Разрабатываемая модель

На основе составленных требований был выделен следующий порядок для разработки:

- Таблица 1. Сравнение характеристик подходов
- Table 1. Comparison of the characteristics of approaches

Сравнение характеристик	Рассматриваемые реализации				
	MAS-CommonKADS	прикладные MAC	Coq	SpGRAPH/Spark	Lean
Поддержка C++	-	-	+	-	+
Применение в сетевых технологиях	-	-	-	-	-
Описание формальных моделей	+	+	+	+	+
Описание прикладных моделей	+	+	+	+	+
Наличие перехода между моделями	+	+	+	+	+
Использование сетей Петри	-	-	-	-	-
Техническое применение	+	+	-	-	-
Простота реализации	-	-	+	+	+
Графическое представление моделей	-	-	+	+	+
Интегрированная среда	-	+	+	+	+

1. Составление модели сети Петри для части одного из существующих транспортных протоколов.

2. Создание конфигурационного файла, который будет хранить все настройки и разметку для формальной модели.

3. Создание программы-транслятора, которая будет переводить объекты формальной модели в объекты прикладной модели (генерация C++ структур, описывающих работу сети).

Рассмотрим основные моменты, которые используются при разработке.

## Правила построения сетей Петри

Первым этапом разработки является разработка модели посредством сети Петри. Сети Петри – это специальные типы моделей, используемые при анализе данных, моделировании, моделировании бизнес-процессов и других сценариях [1]. Этот тип математической конструкции может помочь в планировании рабочих процессов или представлении данных о сложных системах.

Сети Петри используют такие элементы, как позиции, переходы и направления для описания сложных процедур и моделирования работы системы. Фишки и системы маркировки могут отображать перемещение по этим системам. Большая часть модели может быть представлена в классической математической нотации или в виде конкретных рисунков, соответствующих синтаксису и составу модели сети Петри.

Для иллюстрации понятий теории сетей Петри самым удобным является графическое представление. Теоретико-графовым представлением сети Петри является двудольный ориентированный мультиграф, а структура сети Петри представляет собой совокупность позиций и переходов.

Граф сети Петри обладает двумя типами узлов, показанными на рис. 2.

Позиции и переходы соединяют ориентированные дуги (стрелки), при этом некоторые из них направлены от позиций к переходам, а другие – от переходов к позициям. Сеть Петри допускает существование кратных дуг от одной вершины графа к другой. Кратность дуги означает, что позиция и переход связаны не одной дугой, а несколькими. Например, кратность дуги, равная четырем, показывает, что между позицией и переходом нарисованы четыре дуги, направленные в одну сторону.

Каждая дуга должна соединять элементы, принадлежащие разным множествам элементов – позиций (S) и переходов (T). Таким образом, в сети Петри дуг между двумя переходами или двумя позициями быть не может.

Маркировка сети Петри – это присвоение фишек ее позициям. Фишка (или маркер) – это примитивное понятие сетей Петри подобно позициям и переходам. Она может символизировать любой объект, движущийся по сети Петри. Фишки могут быть присвоены только позициям. Число и положение фишек при выполнении сети Петри могут изменяться. Это зависит от ее структуры.

Простое представление системы сетью Петри основано на двух основополагающих понятиях: событиях и условиях.

События – это действия, происходящие в системе. Возникновением событий управляет состояние системы. Состояние системы может быть описано множеством условий.

Условие есть предикат или логическое описание состояния системы. Оно может принимать либо значение «истина», либо значение «ложь». События являются действиями, а каждое событие в системе когда-либо происходит. Для того чтобы событие произошло, необходимо выполнение соответствующих условий.

В сети Петри условия моделируются позициями, события – переходами. При этом входы перехода являются предусловиями соответствующего события, выходы – постусловиями. Возникновение события равносильно запуску соответствующего перехода. Выполнение условия представляется фишкой в позиции, соответствующей этому условию. Запуск перехода удаляет разрешающие фишки, представляющие выпол-

нение предусловий, и образует новые фишки, которые представляют выполнение постусловий.

## SystemC

SystemC удовлетворяет потребность в языке проектирования и проверки системы, охватывающем аппаратное и программное обеспечение. Это фреймворк, встроенный в стандартный C++ [9] путем расширения языка с использованием библиотек классов, который выражает архитектурные и другие атрибуты системного уровня в форме классов C++ с открытым исходным кодом. Он обеспечивает проектирование и проверку на системном уровне. Этот язык особенно подходит для моделирования разделения системы, для оценки и проверки назначения блоков аппаратным или программным реализациям, а также для проектирования и измерения взаимодействий между функциональными блоками. Ведущие компании в области интеллектуальной собственности (IP), автоматизации проектирования электроники (EDA), полупроводников, электронных систем и встроенного программного обеспечения в настоящее время используют SystemC для исследования архитектуры, предоставления высокопроизводительных аппаратных блоков на различных уровнях абстракции и разработки виртуальных платформ для совместного проектирования аппаратного и программного обеспечения. SystemC был стандартизирован Open SystemC Initiative (OSCI) и Accellera Systems Initiative и ратифицирован как IEEE Std. 1666™-2011.

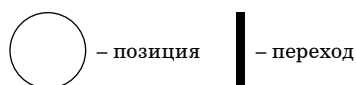
## Разработка программного обеспечения

Реализация проекта начнется с построения сети Петри, удовлетворяющей правилам и теории инструментов моделирования. После чего необходимо разработать программу – симулятор движения фишек по сети с дальнейшим созданием конфигурационного файла. Далее по данным конфигурационного файла необходимо создать программное обеспечение, которое будет генерировать и изменять C++ структуры на основе теории сетей Петри и данных конфигурационного файла для дальнейшей работы с библиотекой SystemC. Ход разработки программного обеспечения представлен на рис. 3.

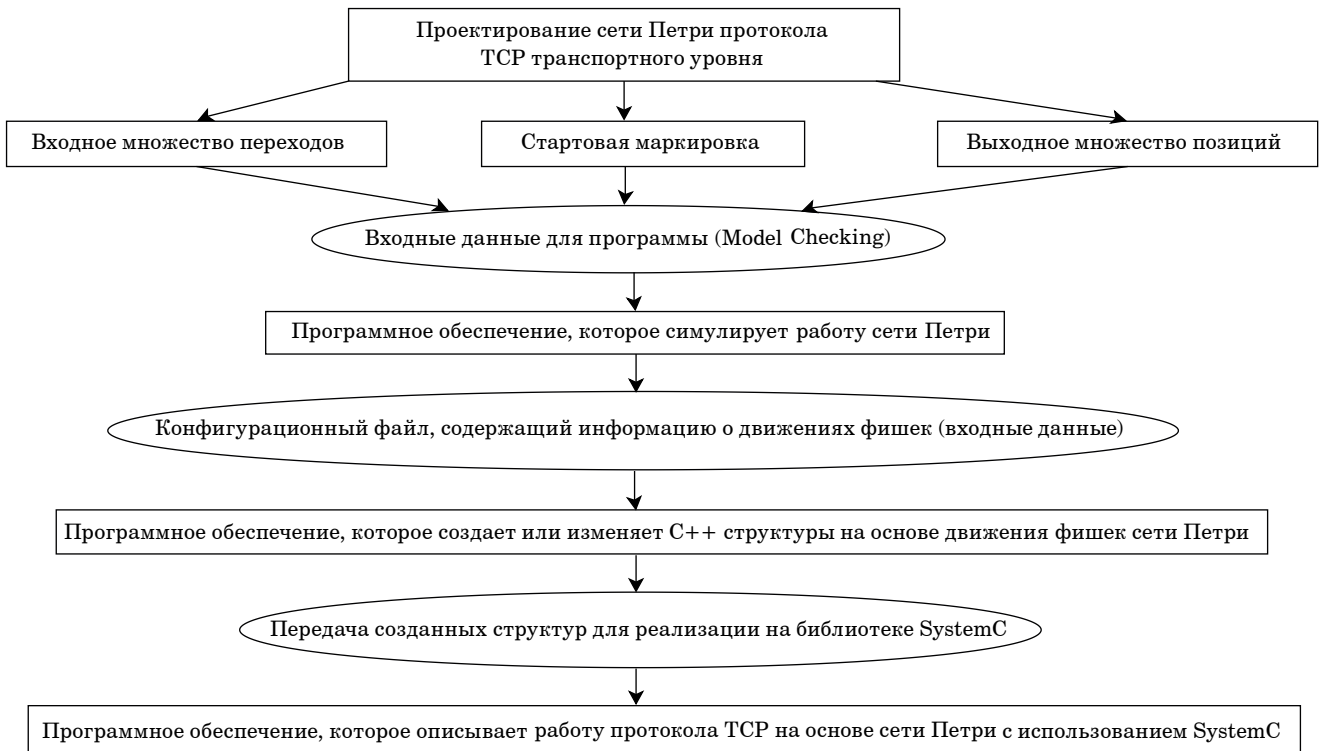
В качестве используемого протокола возьмем часть протокола транспортного уровня TCP/IP [10]. Возьмем схему состояний TCP (рис. 4) и нарисуем на ее основе сеть Петри (рис. 5).

После построения сети Петри необходимо составить таблицу (табл. 2), где будет указано соответствие переходов и позиций.

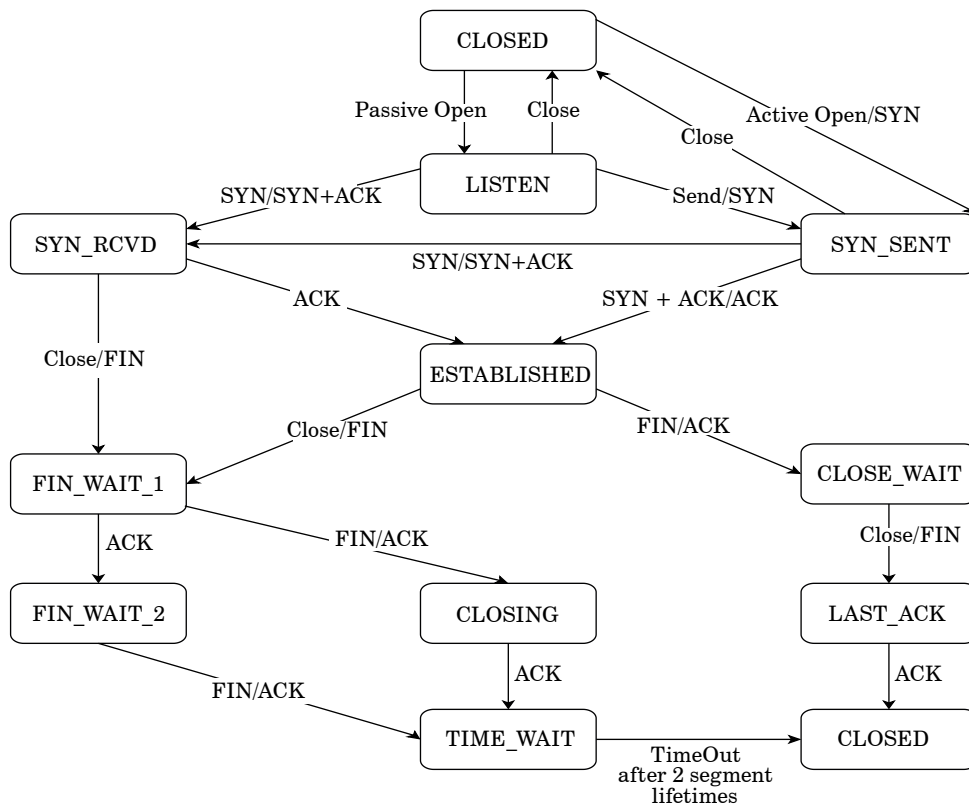
Состояния, описанные в сети Петри, изменяются от команд прикладного уровня модели OSI,



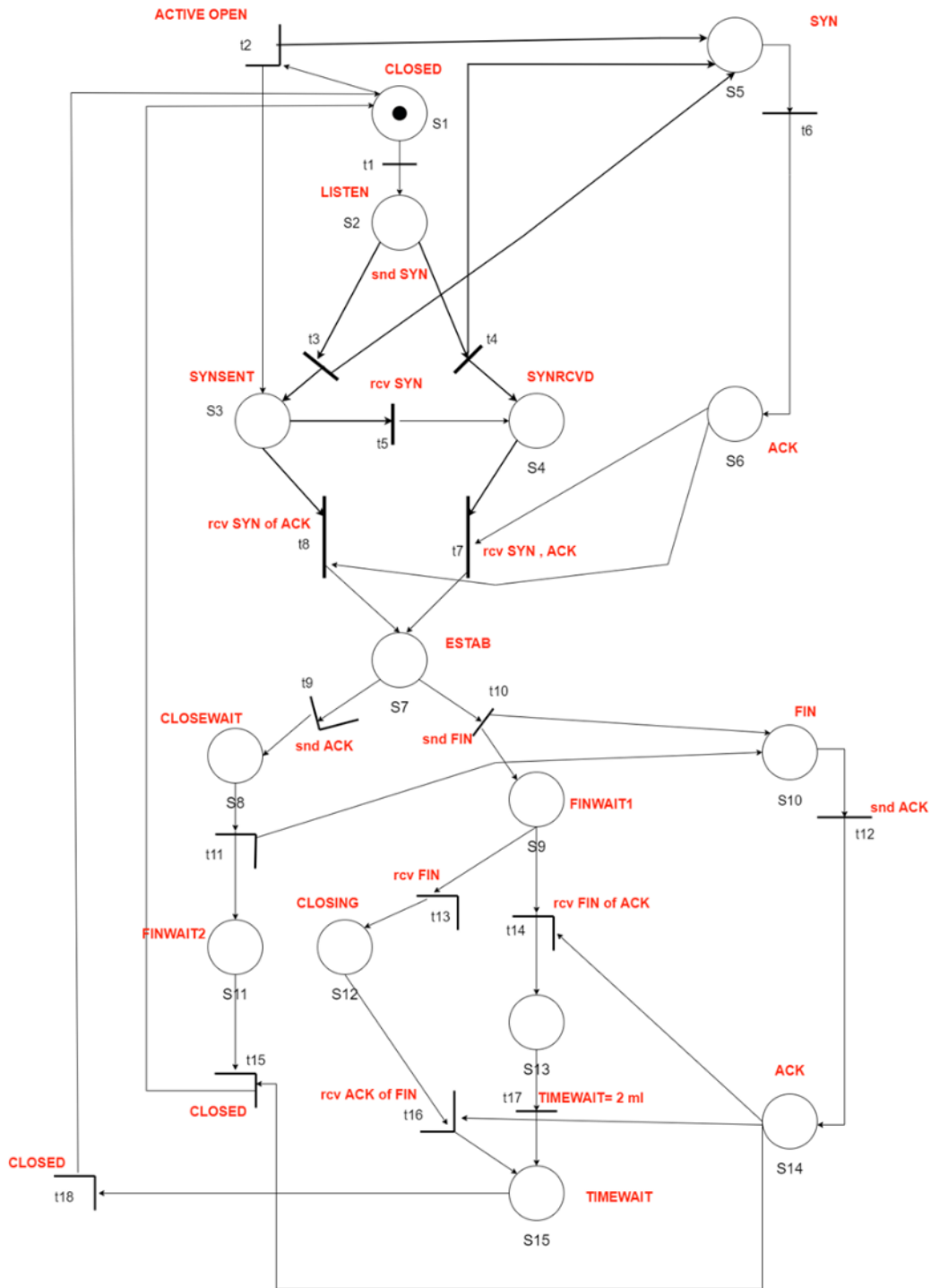
- Рис. 2. Типы узлов сети Петри
- Fig. 2. Types of Petri Net nodes



• Рис. 3. Схема разработки программного обеспечения  
 • Fig. 3. Software development scheme



• Рис. 4. Схема состояний TCP/IP  
 • Fig. 4. TCP/IP Status scheme



• *Рис. 5. Спроектированная сеть Петри*  
 • *Fig. 5. Designed Petri Net*

таких как RECEIVE, SEND, CLOSE, OPEN, и, с другой стороны, под воздействием полей заголовка сетевого уровня.

В данной модели основными состояниями являются:

- CLOSED – режим автономной работы;
- LISTEN – режим прослушивания;

– ESTAB – режим установленного соединения.

Для того чтобы передать данные о сети Петри программе-симулятору, были составлены выходные множества для позиций  $O(s)$  и переходов  $O(t)$  (табл. 3).

На основе этих данных и начальной маркировки сети программа симулятор может произвести

- Таблица 2. Значение позиций и переходов
- Table 2. Position and Transition values

Позиция	Значение	Переход	Значение
s1	CLOSED	t1	AOPEN
s2	LISTEN	t2	POPEN
s3	SYNSENT	t3	SEND
s4	SYNRCVD	t4	rs
s5	SYN	t5	rs1
s6	ACK	t6	SENDACK
s7	ESTAB	t7	ras
s8	CLOSEWAIT	t8	rsa
s9	FINWAIT1	t9	rf
s10	FINWAIT1	t10	CLOSE2
s11	LASTACK	t11	CLOSE3
s12	CLOSING	t12	SENDACK
s13	FINWAIT2	t13	rf1
s14	ACK	t14	raf
s15	TIMEWAIT	t15	raf2
		t16	raf1
		t17	rf2
		t18	end

- Таблица 3. Выходные множества  $O(s)$  и  $O(t)$
- Table 3. Output sets  $O(s)$  and  $O(t)$

Выходные множества сети Петри	
множества для позиций	множества для переходов
$O(s1) = \{t1,t2\}$	$O(t1) = \{s2\}$
$O(s2) = \{t3,t4\}$	$O(t2) = \{s5,s3\}$
$O(s3) = \{t5,t8\}$	$O(t3) = \{s3,s5\}$
$O(s4) = \{t7\}$	$O(t4) = \{s4,s5\}$
$O(s5) = \{t6\}$	$O(t5) = \{s4\}$
$O(s6) = \{t7,t8\}$	$O(t6) = \{s6\}$
$O(s7) = \{t9,10\}$	$O(t7) = \{s7\}$
$O(s8) = \{t11\}$	$O(t8) = \{s7\}$
$O(s9) = \{t13,t14\}$	$O(t9) = \{s8\}$
$O(s10) = \{t12\}$	$O(t10) = \{s9,s10\}$
$O(s11) = \{t15\}$	$O(t11) = \{s11,s10\}$
$O(s12) = \{t16\}$	$O(t12) = \{s14\}$
$O(s13) = \{t17\}$	$O(t13) = \{s12\}$
$O(s14) = \{t14,t16,t15\}$	$O(t14) = \{s13\}$
$O(s15) = \{t18\}$	$O(t15) = \{s1\}$
	$O(t16) = \{s15\}$
	$O(t17) = \{s15\}$
	$O(t18) = \{s1\}$

```

Начальное состояние
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Текущая маркировка: 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Активные переходы:
1 2
Выберите активный переход: 1
Текущая маркировка: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Активные переходы:
3 4
Выберите активный переход:
    
```

- Рис. 6. Процесс моделирования формальной модели
- Fig. 6. The process of modeling a formal model

моделирование работы сети, которое показано на рис. 6.

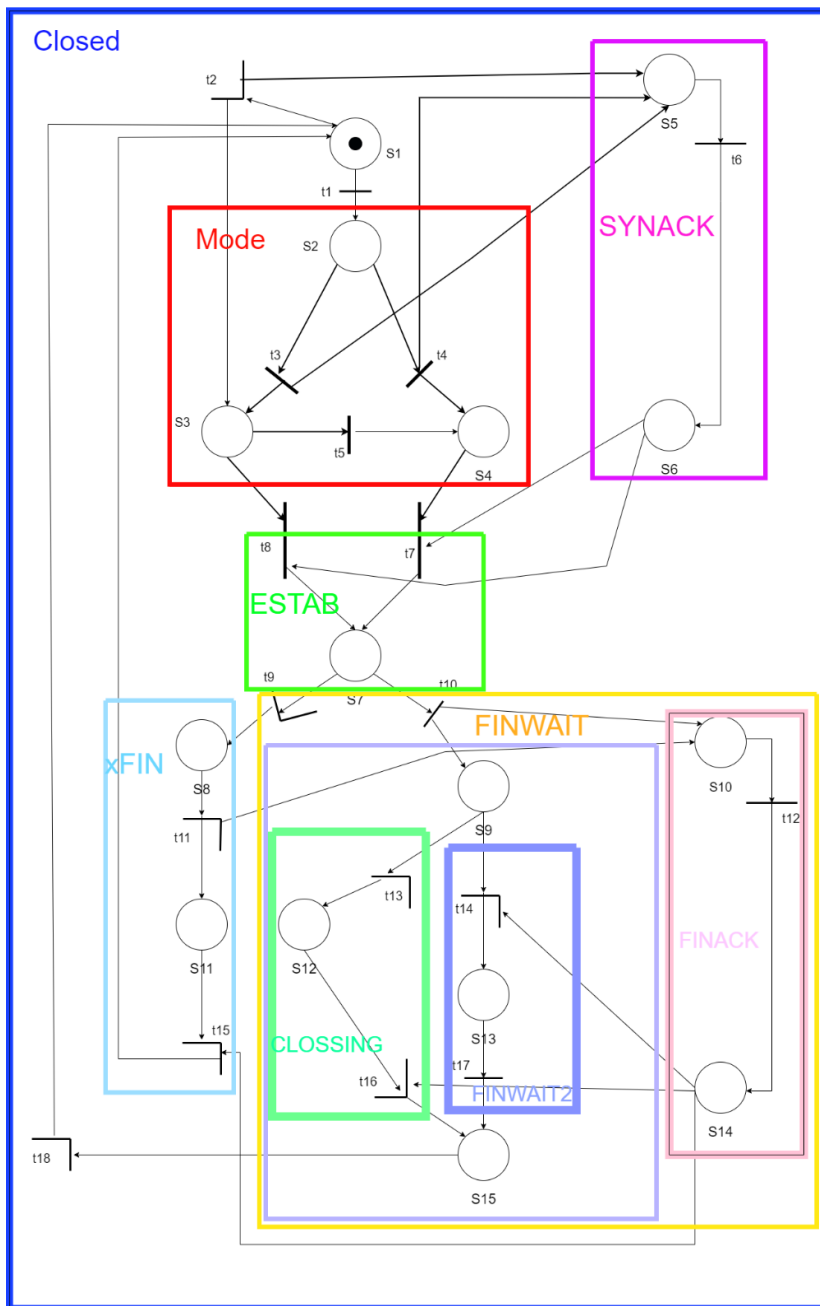
По окончании моделирования симулятор формальной модели готовит конфигурационный файл с матрицей (рис. 7) настроек для генерирования промежуточных текстов с кодом программы, который будет использоваться для генерации прикладной модели сети.

```

MyConfig - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
| 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
    
```

- Рис. 7. Конфигурационный файл
- Fig. 7. Configuration file

Для рассматриваемой части протокола TCP/IP было предложено разбиение на блоки формальной модели, чтобы потом каждый из полученных блоков генерировать в отдельную промежуточ-



- *Рис. 8. Разбиение модели на блоки*
- *Fig. 8. Splitting the model into blocks*

ную структуру. Данное разбиение представлено на рис. 8.

После этого на основе конфигурационного файла и преобразованных данных происходит компиляция и запуск имитационной модели на SystemC (рис. 9).

Полученная прикладная модель выполняет все возложенные на нее функции. Однако данный результат далек от финального решения:

– разбивка на блоки элементов формальной модели происходит вручную. Необходимо унифицировать структурное разделение и сделать процесс автоматизированным;

цировать структурное разделение и сделать процесс автоматизированным;

– формальная модель представлена только текстовым файлом. Нет возможности визуально посмотреть выполнение сети Петри. Необходимо доработать симулятор формальной модели;

– полученная прикладная имитационная модель использует малые возможности SystemC и по своей структуре представляет собой один большой файл, которые очень неудобны в обработке. Необходимо разбивать полученную модуль



8. Lean language. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Lean> (дата обращения: 20.10.2022).
9. Open Standarts. URL: <https://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/> (дата обращения: 20.10.2022).
10. Зайцев Д. А. Верификация протокола TCP в процессе последовательной композиции модели Петри. Одесса: ОНАС, 2006. 15 с.

## REFERENCES

1. Olenev V. L. Modeling of the systems: study guide. SPb.: SUAI; 2015. 95 p. (In Russ.).
2. SystemC. Available from: <https://systemc.org> [Accessed 20 October 2022].
3. Shvetsov A. N. Agent-based systems: from formal models to industrial applications. Vologda: VSTU; 2008. 101 p. (In Russ.).
4. Vittikh V. A., Skobelev P. O. Multi-agent systems for modelling of self-organisation and co-operation processes. Proc. of XIII Intern. conference on the application of artificial intelligence in engineering. Ireland, Galway; 1998, pp. 91–96.
5. Ringer T. et al. QED at large: a survey of engineering of formally verified software. Foundations and trends® in programming languages. 2019;5(2-3):102–281.
6. Trunov A. Lecture 1. Introduction to the language of formal verification Coq. Lectorium. Available from: [https://www.youtube.com/watch?v=T\\_q5sQ5pQ7g](https://www.youtube.com/watch?v=T_q5sQ5pQ7g) [Accessed 20 October 2022].
7. PSGraph: How tencent trains extremely large-scale graphs with Spark?. IEEE 36<sup>th</sup> International conference on data engineering (ICDE). 2020, pp. 1549–1557.
8. Lean language. Available from: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Lean> [Accessed 20 October 2022].
9. Open Standarts. Available from: <https://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG21/> [Accessed 20 October 2022].
10. Zaitsev D. A. Verification of the TCP protocol in the process of sequential composition of the Petri model. Odessa: ONAT; 2006. 15 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Синёв Николай Иванович**, старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – имитационное моделирование, встроенные системы, бортовые вычислительные сети, коммуникационные протоколы.

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

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

**Sinyov Nikolay I.**, Senior Lecturer at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – simulation modeling, embedded systems, on-board networks, communication protocols.

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

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

Поступила в редакцию 26.10.2022

Поступила после рецензирования 14.11.2022

Принята к публикации 28.02.2023

Received 26.10.2022

Revised 14.11.2022

Accepted 28.02.2023



Научная статья  
УДК 004.896

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-64-75

## Исследование предиктивной аналитики на базе микроконтроллера с применением методов TinyML

**Фук Хао До<sup>1, 2</sup>**

✉ haodp@dau.edu.vn, orcid.org/0000-0003-0645-0021

**Чан Дык Ле<sup>3</sup>**

letranduc@duf.udn.vn, orcid.org/0000-0003-3735-0314

**Максим Артемович Зуйков<sup>1</sup>**

maximz2004@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4270-640X

**Александр Александрович Берёзкин<sup>1</sup>**

aa.berezkin@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1748-8642

**Руслан Валентинович Киричэк<sup>1</sup>**

kirichек@sut.ru, orcid.org/0000-0002-8781-6840

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Архитектурный университет Дананга, Дананг, Вьетнам

<sup>3</sup> Университет науки и технологий – Университет Дананга, Дананг, Вьетнам

**Аннотация.** Стремительный рост миниатюризации малоомощных встраиваемых устройств и прогресс в оптимизации алгоритмов машинного обучения (ML) открыли новые перспективы для Интернета вещей. Это реализация алгоритма ML в устройствах Интернета вещей. Фреймворк TinyML был создан с этой целью. Способность обеспечивать надежную работу устройств Интернета вещей без постоянного доступа к облачным сервисам при одновременной работе ML делает его многообещающим вариантом для приложений Интернета вещей, ищущих экономически эффективные решения. Raspberry Pi Pico – это плата микроконтроллера, которая хорошо подходит для использования в TinyML и других приложениях, требующих низкого энергопотребления и небольшого форм-фактора. В этом исследовании рассматриваются характеристики устройства Raspberry Pi Pico W и возможности TinyML, реализуя прогностическую модель на этом устройстве с использованием модели нейронной сети.

**Ключевые слова:** TinyML, Raspberry pico, модели искусственного интеллекта, микроконтроллер

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-49-02023 «Разработка и исследование методов повышения надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ нового поколения».

**Для цитирования:** До Ф. Х., Ле Ч. Д., Зуйков М. А., Берёзкин А. А., Киричэк Р. В. Исследование предиктивной аналитики на базе микроконтроллера с применением методов TinyML // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 64–75. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-64-75.

Original article

## Predictive analytics research based on a microcontroller using TinyML methods

**Phuc Hao Do<sup>1, 2</sup>**

✉ haodp@dau.edu.vn, orcid.org/0000-0003-0645-0021

**Tran Duc Le<sup>3</sup>**

letranduc@duf.udn.vn, orcid.org/0000-0003-3735-0314

**Maksim A. Zuikov<sup>1</sup>**

maximz2004@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4270-640X

**Aleksandr A. Berezkin<sup>1</sup>**

pcdreams@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1748-8642

**Ruslan V. Kirichек<sup>1</sup>**

kirichек@sut.ru, orcid.org/0000-0002-8781-6840

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

<sup>2</sup> Danang Architecture University, Da Nang, Viet Nam

<sup>3</sup> University of Science and Technology – The University of Danang, Da Nang, Viet Nam

**Abstract.** The rapid growth in the miniaturization of low-power embedded devices and advancement in the optimization of machine learning (ML) algorithms have opened up a new prospect for the Internet of Things (IoT). It is the implementation of the ML algorithm within the IoT device. TinyML framework was born with that purpose. Its ability to empower the IoT device to function reliably without consistent access to cloud services while delivering accurate ML services makes it a promising option for IoT applications seeking cost-effective solutions. The Raspberry Pi Pico is a microcontroller board which is well suited for use in TinyML and other applications that require low power consumption and a small form factor. In this study, we review the characteristics of the Raspberry Pi Pico W device and the ability of TinyML by implementing a predictive model on that device using a Neural Network model.

**Keywords:** TinyML, Raspberry pico, AI models, microcontroller

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation within of scientific project no. 22-49-02023 "Development and study of methods for obtaining the reliability of tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms of a new generation".

**For citation:** Do P. H., Le T. D., Zuykov M. A., Beryozkin A. A., Kirichek R. V. Predictive analytics research based on a microcontroller using TinyML methods. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):64–75. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-64-75.

## Введение

На протяжении десятилетий множество исследований были посвящены совершенствованию встроенных технологий для сред с ограниченными ресурсами. В связи с этим встраиваемые системы на базе микроконтроллерных блоков (MCU) привлекли огромное внимание, в первую очередь из-за низкого энергопотребления и недавней разработки крошечных микроконтроллеров размером с муравья [1]. Более того, микроконтроллер обладает важнейшими характеристиками производительности и надежности, такими как безопасность, защищенность, безотказность, ремонтпригодность [2]. Таким образом, микроконтроллеры стали повсеместными, и их влияние на исследования быстро растет.

Микроконтроллеры также играют центральную роль в качестве революционных периферийных устройств во всей экосистеме Интернета вещей (IoT), от сбора данных датчиков и приведения систем в действие до передачи и получения информации [3, 4].

За последнее десятилетие были достигнуты заметные достижения в области машинного обучения (ML): глубокого обучения (DL), нейронных сетей (NNS), усиленного обучения и т. д. Но их использование было ограничено только графическими процессорами, центрами обработки данных и суперкомпьютерами. К сожалению, использование этих алгоритмов в микроконтроллерах ранее в значительной степени оставалось без внимания из-за их ограниченных ресурсов. Основным фактором, замедляющим интеграцию алгоритмов ML в микроконтроллеры, являются небольшие размеры их встроенной памяти, не вмещающей сложные большие алгоритмы ML.

Подсчитано, что в 2023 г. спрос на рынке периферийных вычислений достигнет 1,12 трлн долл. по всему миру. В этой связи необходимо активно добиваться улучшения уровня Интернета вещей наряду с особым акцентом на ML в его устройствах.

Существует множество попыток применить ML к микроконтроллерам в ITS. *TinyML* [5] является одной из них, в микроконтроллерах в устройстве IoT – это фреймворк, который помогает решать задачи ML [6]. Традиционный подход заключается в том, что система, основанная на IoT, полагается на edge и облачные сервисы для предоставления услуг ML. *TinyML* делает устройства Интернета вещей интеллектуальными. Это подразумевает, что микроконтроллер, сопряженный с датчиками, может локально выполнять алгоритм ML для прогнозирования или классификации данных, поступающих с датчиков.

Более того, реализации *TinyML*, особенно на таких устройствах, как *Raspberry Pi Pico W*, распространены из-за их низкой стоимости, низкого энергопотребления, портативности и возможностей обработки в реальном времени.

**Преимущества *TinyML*.**

**Низкая стоимость:** микроконтроллеры, подобные *Raspberry Pi Pico W*, как правило, намного дешевле более мощных компьютеров, что делает их привлекательным вариантом для тех, кто хочет внедрить ML с ограниченным бюджетом.

**Низкое энергопотребление:** *TinyML* позволяет запускать модели ML с низкими требованиями к энергопотреблению на устройствах с батарейным питанием, что делает его идеальным для использования в IoT и приложениях для периферийных вычислений.

**Переносимость:** микроконтроллеры, такие как *Raspberry Pi Pico W*, небольшие и легкие, что облегчает их транспортировку и использование в различных средах.

**Обработка в реальном времени:** *TinyML* позволяет запускать модели ML в режиме реального времени на устройстве, позволяя принимать решения или предпринимать действия на основе выходных данных модели без необходимости подключения к облаку.

В этой статье мы рассматриваем возможность применения *TinyML* на конкретном устройстве микроконтроллера, *Raspberry Pi Pico*, для выпол-

нения простой задачи анализа и прогнозирования с данными, собранными с датчиков, подключенных к *Raspberry Pi Pico*.

Наш вклад заключается в следующем:

– представление ключевых показателей эффективности фреймворка *TinyML* вместе с его определением;

– установление внутренней связи между традиционным ML, реализованным в микроконтроллерах, и *Tiny ML*;

– реализация прогнозирования снегопада с использованием *TinyML* с *Raspberry Pi Pico W* для оценки производительности этой комбинации.

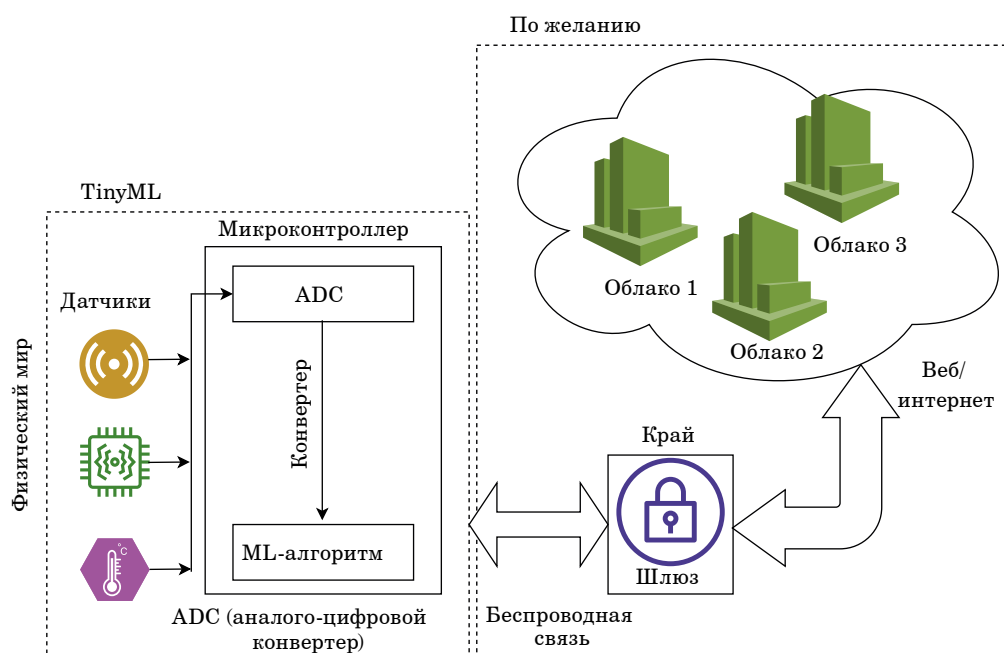
### **TinyML – комбинация машинного обучения с микроконтроллером**

*TinyML* стремится обеспечить вывод ML на устройствах Интернета вещей со сверхнизким энергопотреблением, обычно менее милливатта [7], тем самым преодолевая традиционный энергетический барьер, препятствующий широкому распространению машинного интеллекта. Выполняя автономный вывод вблизи источников данных, *TinyML* обеспечивает отличную скорость отклика, избегая при этом затрат энергии, связанных с беспроводной связью, которые намного выше, чем при вычислениях.

Кроме того, благодаря внедрению *TinyML* каждое устройство Интернета вещей становится интеллектуальным. Это позволяет устройствам

анализировать данные на самом высоком уровне, ускоряя принятие решений. Такая парадигма также может быть применена в различных вариантах использования для предоставления автономных служб ML, минуя необходимость в архитектуре Интернета вещей. Благодаря своему потенциалу для реализации моделей ML в недорогой среде с ограниченными ресурсами, *TinyML* привлекла большое внимание со стороны академических кругов и промышленности. Эксперты-исследователи сотрудничают и работают над разработкой решений *TinyML*. Это также привело в 2019 г. к созданию сообщества *TinyML*, целью которого является разработка систем, аппаратного обеспечения, алгоритмов, программного обеспечения и приложений для этой платформы [1]. Рабочий процесс *TinyML* в среде Интернета вещей показан на рис. 1.

Стоит отметить, что цель *TinyML* состоит не в том, чтобы полностью заменить облачные вычисления, а в том, чтобы оснастить конечное устройство определенными вычислительными возможностями. Чтобы обеспечить своевременное обслуживание, можно соединить несколько устройств Интернета вещей. Каждое устройство выполняет свою собственную аналитику отдельно как компонент более крупной системы и регулирует передачу информации в облако. Другой подход заключается в изоляции устройств от экосистемы Интернета вещей, предполагая, что каждая модель работает отдельно, не нуждаясь в других слоях IoT.



- Рис. 1. Рабочий процесс *TinyML* в Интернете вещей
- Fig. 1. *TinyML* workflow in IoT

В *TinyML* вычисления, выполняемые вблизи датчиков, могут улучшить или внедрить новые методы анализа данных, ранее недоступные в условиях ограниченных ресурсов. Присущие платформе *TinyML* функции, такие как гибкость, экономия средств и простота, заслуживают внимания из-за их потенциала для преобразования экосистемы Интернета вещей. Вот еще некоторые из преимуществ *TinyML*.

**Пропускная способность.** Традиционный IoT требует подключения датчика к сети шлюзов, а их – к сети Интернет и облачных сервисов для приема данных, обработки информации и запуска алгоритмов ML. Однако инновационные подходы к *TinyML* в условиях ограниченных ресурсов могут переопределить эти требования, сократив использование облачных сервисов и сделав другие уровни Интернета вещей необязательными.

**Безопасность и приватность.** Безопасность данных – это фактор, который негативно влияет на принятие Интернета вещей, поскольку большие объемы личных данных передаются в облако. Конечному пользователю остается неясным, где хранится его личная информация и кому принадлежат данные, когда сторонние поставщики используются для предоставления услуг IoT. Более того, передача данных открывает возможность их перехвата вредоносными источниками. Таким образом, предотвращение потока данных и их хранение в пределах устройства повышает безопасность и конфиденциальность. В *TinyML* данные не передаются (или передаются в меньшем объеме), поэтому они менее подвержены атакам. В результате в *TinyML* функции защиты данных и конфиденциальности встроены по умолчанию.

**Задержка.** Цепочка событий в системе Интернета вещей начинается с передачи данных датчиков на облачные серверы и заканчивается приемом решения (прогноза), вычисленного в облаке устройствами IoT. Из этой последовательности событий ясно, что такой подход создает значительную задержку, следовательно, требует анализа вблизи устройства. Практический подход к этой проблеме заключается в использовании *TinyML*.

**Низкая стоимость.** Сокращение трафика данных снижает требования к пропускной способности, что снижает стоимость. По этой причине решения *TinyML* в сочетании с облачными технологиями могут повысить пропускную способность традиционных облачных сервисов и предложить новые возможности для обработки данных или передачи задач микроконтроллерам для улучшения вышеупомянутых показателей

производительности. Итак, *TinyML* – это новейший тренд, и многие провозгласили его технологией, которая даст толчок четвертой промышленной революции или цифровой революции в отдельных отраслях.

**Надежность.** Одной из важнейших характеристик является способность выполнять вычисления на основе данных в сенсорной сети. *TinyML* – это решение для выполнения задач на месте, например в открытом море и сельских районах, где сотовая связь или интернет очень ограничены. Это изменение, в свою очередь, повышает надежность сервисов Интернета вещей.

## Raspberry Pi Pico W

*Raspberry Pi* – это недорогая, небольшая и портативная компьютерная плата. Ее можно использовать для подключения к монитору компьютера, телевизору, клавиатуре, мыши, флэшке и т. д. *Raspberry Pi* имеет встроенное программное обеспечение, которое позволяет пользователям программировать и создавать анимацию, игры или захватывающие видеоролики. Кроме того, программисты могут разрабатывать скрипты или программы, используя язык *Python*; это основной язык ядра в операционной системе *Raspbian* [8]. *Raspberry Pi B+* – это эволюция модели B. Ее рекомендуется использовать для школьного обучения, поскольку она обеспечивает большую гибкость, чем модель A, особенно для встроенных проектов [9]. Существует также несколько других моделей *Raspberry Pi*. Каждая из них обладает собственным уникальным набором функций и возможностей.

Текущая линейка продуктов *Raspberry Pi* включает в себя следующие модели.

1. *Raspberry Pi Pico W*: это плата микроконтроллера с двухъядерным процессором *Arm Cortex-M0+* и 2 Мб встроенной флэш-памяти. Он хорошо подходит для использования в *TinyML* (машинное обучение на микроконтроллерах) и других приложениях, требующих низкого энергопотребления и небольшого форм-фактора.

2. *Raspberry Pi 400*: этот компактный настольный компьютер оснащен процессором *Raspberry Pi 4 Model B*, 4 Гб оперативной памяти и встроенной клавиатурой. Он разработан как простой в использовании компьютер для повседневных задач, таких как просмотр веб-страниц, обработка текстов и воспроизведение видео.

3. *Raspberry Pi 4 Model B*: это мощный одноплатный компьютер с четырехъядерным процессором *Arm Cortex-A72*, объемом оперативной памяти до 8 Гб и рядом возможностей подключения,

включая Wi-Fi и Bluetooth. Он подходит для использования в качестве настольного компьютера, медиacentра или платформы разработки.

4. *Raspberry Pi 3 Model B+*: эта более старая модель *Raspberry Pi* все еще доступна, оснащена четырехъядерным процессором *Arm Cortex-A53*, 1 Гб оперативной памяти и рядом возможностей подключения, включая Wi-Fi и Bluetooth. Она подходит для использования в качестве компьютера общего назначения или платформы разработки.

В этой статье мы сосредоточимся на *Raspberry Pi Pico W*. В таблице приведены технические характеристики устройства.

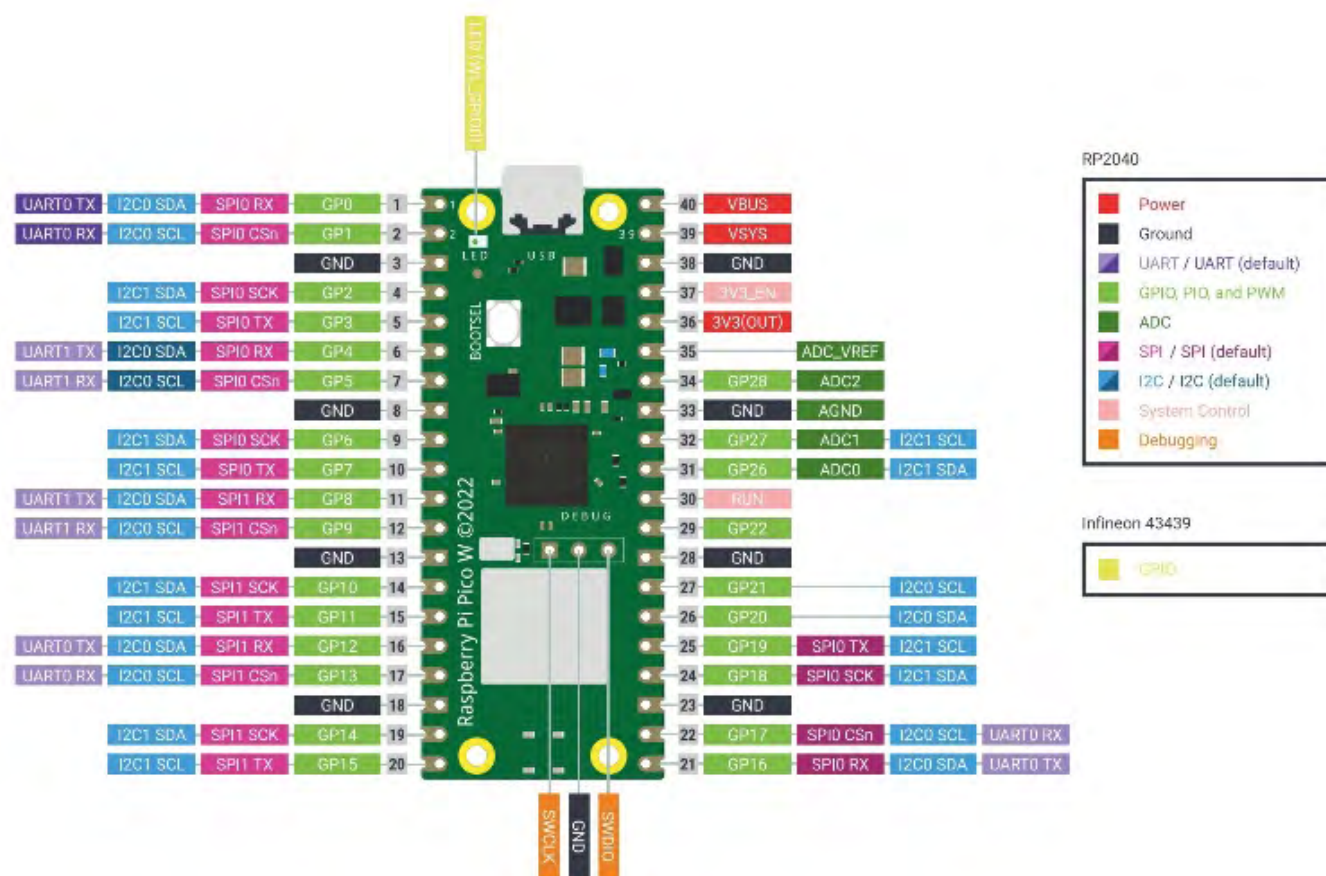
*Raspberry Pi Pico W* – это новая плата разработки, которую можно эффективно использовать в различных направлениях исследований и разработок. Распиновки для нее показаны на рис. 2. Беспроводная связь, включая Wi-Fi и Bluetooth, была интегрирована в компактную плату, и больше нет необходимости в громоздких модулях расширения. *Raspberry Pi Pico W* обладает следующими функциями:

– 23 General Purpose Digital I/O only pins (GP0 – GP22);

- *Raspberry Pi Pico W*
- *Raspberry Pi Pico W*

Частота процессора	133 МГц
Микроконтроллер	RP2040
Ядра	2
Флэш-память	2 Мб
ОЗУ	264 Кб
GPIO	26 (user-usable)
Тип USB	micro-USB
Wi-Fi или Bluetooth	Оба. Bluetooth не был включен при запуске
Напряжение	1,8–5,5 В или 5 В USB
Размер	51×21 мм
Языки	MicroPython / C

- General Purpose pins that can be used for digital I/O (GP26 – GP28) or ADC inputs;
- One 12-bit 500kps ADC;
- On-board LED (GP25);
- On-board temp sensor;



• Рис. 2. Распиновка *Raspberry Pi Pico W*  
 • Fig. 2: *Raspberry Pi Pico W* pinout

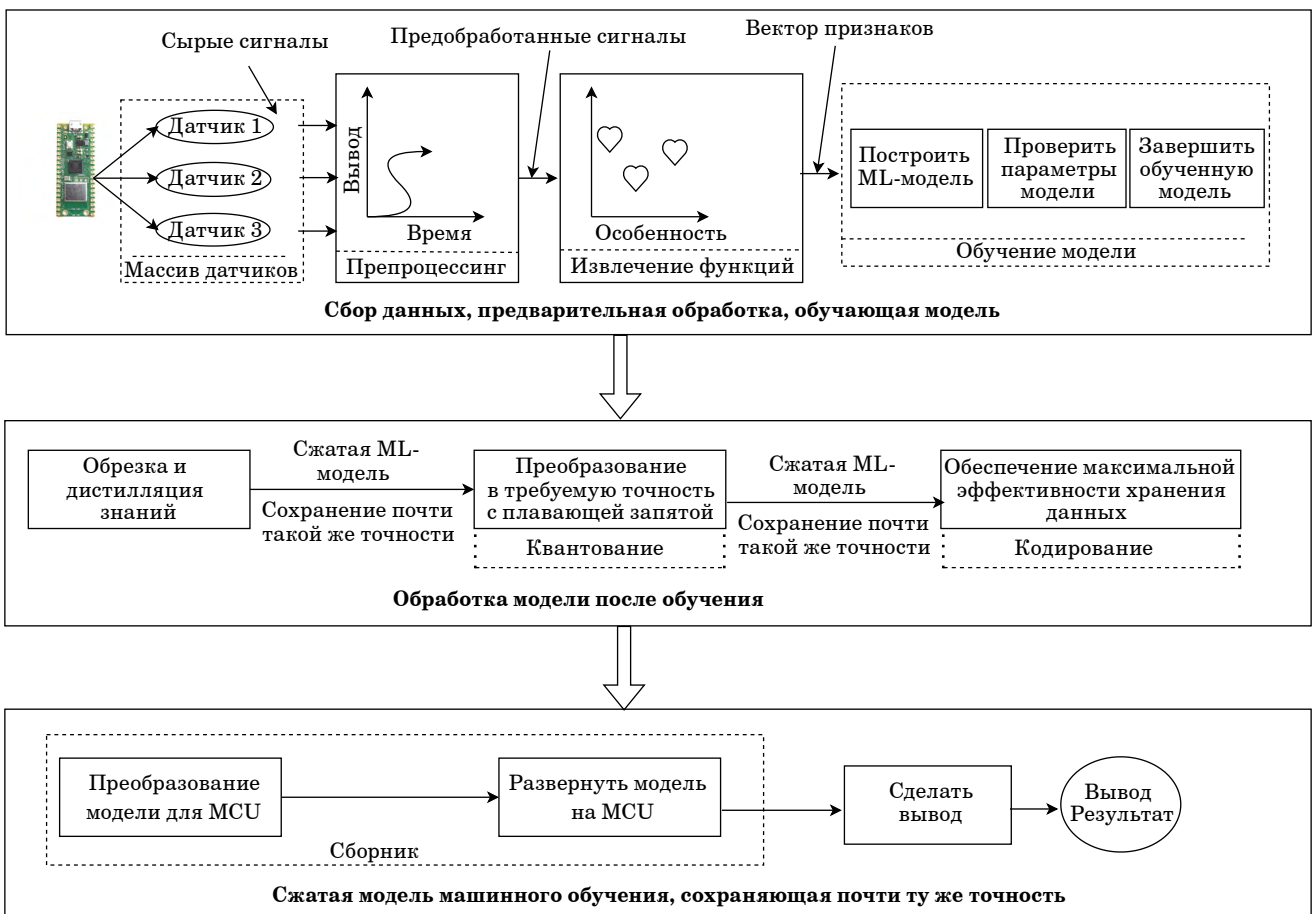
- Digital peripherals:
- 2 UART (UART0/1 TX, RX);
- 2 I2C (I2C0/1 SDA, SCL);
- 2 SPI (SPI0/1 SCK, TX, RX, CSn);
- 16 PWM (General Purpose pins – 8 slices, each with two outputs).

## Лабораторный стенд

Оптимизация алгоритма ML является более сложной задачей. Следовательно, аппаратное и программное обеспечение должны быть соответствующим образом адаптированы для разработки фреймворков, которые облегчили бы эти проблемы. Эти две области, которые ранее не изучались вместе, уже привлекли внимание многих исследователей. Исследования и разработка оборудования, способного эффективно выполнять модели ML, имеют первостепенное значение. Однако требуется равный прогресс в программном обеспечении, учитывая ограниченные ресурсы маломощных микроконтроллеров.

В условиях высоких ресурсов, таких как облачные сервисы, они могут эффективно выполнять массивно-параллельную архитектуру алгоритмов ML благодаря доступности по требованию огромной памяти и вычислительной мощности. В микроконтроллерах ресурсы уже ограничены. Таким образом, развертывание модели ML в такой среде сопряжено со значительными трудностями. После обучения алгоритм ML разрабатывается для создания модели с более компактным представлением для целевых микроконтроллеров с использованием методов глубокого сжатия.

На сегодняшний день было предложено несколько инструментов *TinyML*, включая следующие: методы глубокого квантования [10], поиск нейронной архитектуры с учетом памяти [11], фреймворки оптимизации (такие как TFL) и специализированные библиотеки вывода [12]. Метод глубокого квантования стал главным объектом исследований *TinyML* и обсуждается далее. На рис. 3 показан полный цикл потока исследований. Этот поток состоит из трех основных процессов.



• Рис. 3. Поток исследований  
• Fig. 3. The research flow

Сначала данные датчиков с физического устройства собираются, затем проходит их предварительная обработка и извлечение признаков и, наконец, данные проходят через обучающую модель. Мы получаем модель, обученную с использованием полученных входных данных.

После обучения модели мы начинаем обработку обученной модели, используя некоторые методы, такие как обрезка в сочетании с квантованием и кодированием.

Наконец, мы преобразуем модель в *MCU* и развертываем ее непосредственно на этом устройстве. Этот процесс называется инкапсуляцией модели и фактическим развертыванием.

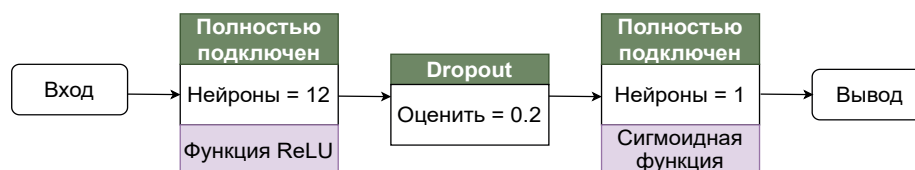
Полученные таким образом необработанные сигналы или данные предварительно обрабатываются для извлечения признаков. Извлеченные функции служат входными данными для нейронной сети как для обучения, так и для тестирования. Шаги, упомянутые ранее, аналогичны любой задаче классификации. Однако в *TinyML* в сети используется несколько методов сжатия для создания модели, которая может поместиться в микроконтроллерах. Шаги, необходимые для глубокого сжатия алгоритмов ML, могут быть сформулированы как обрезка, квантование, кодирование и компиляция.

## Применение модели нейронной сети к лабораторному стенду

Чтобы оценить эффективность и возможности *TinyML* на *Raspberry Pi Pico W*, мы реализуем задачу прогнозирования снегопада с использованием данных, полученных от датчиков на *Raspberry Pi Pico W*.

Модель, разработанная для прогнозирования выпадения снега, представляет собой модель бинарной классификации (рис. 4). Сеть состоит из следующих слоев:

- полносвязный слой с 12 нейронами и последующей функцией активации ReLU;
- слой dropout с коэффициентом 20 % (0,2) для предотвращения переобучения модели;
- полносвязный слой с одним выходным нейроном и сигмоидной (sigmoid) функцией активации.



• Рис. 4. Модель нейронной сети для прогнозирования выпадения снега  
• Fig. 4. Neural network model for predicting snowfall

Узел ввода предоставляет сети шесть входных параметров: температуру и влажность за каждый из последних трех часов.

Модель использует входные объекты и возвращает вероятность в выходном узле. В этом эксперименте, основываясь на предсказанной вероятности выходных данных модели, возникает задача бинарной классификации. Это означает, что если предсказанная вероятность выходных данных больше или равна 0,5, то предсказанный результат означает «да» (это указывает на наличие снега). Следовательно, если предсказанный результат меньше 0,5, то предсказанный результат означает «нет», что указывает на отсутствие снега.

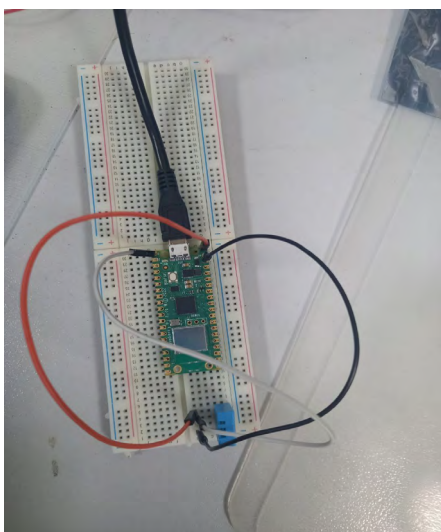
Экспериментальная установка и непосредственное развертывание устройства *Raspberry Pi Pico W* показаны на рис. 5. Устройство постоянно собирает данные с датчиков, измеряющих температуру и влажность. Как только модель будет обучена, мы сможем внедрить ее в устройство для прогнозирования снегопада.

В этом разделе мы углубимся в часто используемые методы при использовании моделей машинного обучения для устройств с ограниченными ресурсами.

После подготовки данных с помощью модели нейронной сети приступим к обработке этой модели следующими методами.

– *Дистилляция знаний (KD)*: нейронные сети часто имеют много связей – как значимых, так и избыточных. Информация в конечной модели, которая была обучена, передается в меньшую сетевую модель с меньшим количеством параметров. Это сжимает часть сетевых данных, уменьшая размер модели.

– *Обрезка*: метод обрезки обычно представляет собой итеративный процесс, используемый для преобразования плотной нейронной сети в разреженную сеть. Сеть первоначально обучается с использованием обычного подхода к обучению для создания сокращенной модели. Впоследствии, как было предложено в [13], значимые связи определяются путем размещения весов выше определенного порога. Сокращение достигается путем удаления связей, вес которых опускается ниже порогового предела.



• Рис. 5. Экспериментальная установка  
• Fig. 5. Experimental setup

– *Квантование*: с помощью обрезки и KD мы получаем меньшее количество параметров, из-за чего уменьшается размер модели. Чтобы еще больше ее уменьшить, применяется метод квантования для уменьшения количества битов, необходимых для представления этих параметров. Поэтому после обрезки и дистилляции следующим процессом является квантование, при котором точность алгоритма с плавающей запятой уменьшается, чтобы соответствовать архитектуре микроконтроллера [14].

– *Кодирование*: это необязательный процесс, который обеспечивает максимальную эффективность хранения данных и реализован для дальнейшего уменьшения размера модели ML. Наиболее популярной схемой кодирования, используемой в ML, является кодирование Хаффмана, которое представляет собой метод сжатия данных переменной длины без потерь. Он кодирует более частые веса меньшим количеством битов, а нечастые веса большим количеством битов. Схема кодирования Хаффмана может дополнительно уменьшить размер сети до 49 раз, сохраняя тот же уровень точности [15].

– *Компиляция*: это заключительный шаг. На этом этапе интерпретатор используется для преобразования модели ML, разработанной с использованием любого языка, в язык, который легко понятен MCU [16], например встроенный C. Как правило, интерпретаторы, подобные TFL, используются для преобразования скриптов, написанных на Python, в выходной файл C++. Сгенерированный выходной файл затем записывается в MCU с помощью любого кросс-компилятора.

Микроконтроллер Pico работает на MicroPython, разновидности программирования на

Python, который облегчает создание, дополнение, модификацию, хранение и удаление файлов. Таким образом, хранение данных становится простым и энергоэффективным. Мы будем собирать данные с помощью датчиков и использовать язык Python для чтения и сохранения данных в виде csv-файлов.

## Описание набора данных

В этом эксперименте мы соберем исторические почасовые данные о температуре, влажности и снегопадах, чтобы создать набор данных для прогнозирования снега. Мы можем собирать почасовые данные о погоде из различных источников, но большинство из них не являются бесплатными или имеют ограниченные возможности использования. Для этой статьи мы используем WorldWeatherOnline, который имеет бесплатный пробный период в 30 дней и предоставляет:

- простой API через HTTP-запросы для получения данных;
- исторические данные о погоде по всему миру;
- 250 запросов данных о погоде в день.

Данные состоят из трех атрибутов: temperature, humidity и метки is\_snow. Атрибут temperature представляет входное значение температуры. Аналогично, humidity представляет значение влажности входных данных. В свою очередь is\_snow представляет метку классификации, относительно того, является ли погода снежной или же нет, на основе входных параметров, включающих температуру и влажность.

## Предварительная обработка данных

Для обработки данных мы будем использовать нормализацию и стандартизацию. Два наиболее часто используемых метода – это нормализация min-max и стандартизация по Z-баллам:

– следующее уравнение используется для применения нормализации min-max для изменения значений объектов наборов данных в диапазоне от нуля до единицы:

$$X_{\text{normalized}} = \frac{X - X_{\text{min\_value}}}{X_{\text{max\_value}} - X_{\text{min\_value}}}, \quad (1)$$

где  $X_{\text{normalized}}$  представляет нормализованное значение,  $X_{\text{min\_value}}$  и  $X_{\text{max\_value}}$  – граничный диапазон предполагаемого интервала [0, 1], а  $X$  – начальное значение, которое будет изменено внутри этих диапазонов;

– стандартизация по Z-баллам используется для масштабирования объектов набора данных,



отражающих характеристики нормального распределения со средним значением  $\mu=0$  и стандартным отклонением  $\sigma = 1$ .

$$X_{\text{normalized}} = \frac{X - \mu}{\sigma}. \quad (2)$$

### Обучающая модель и развертывание в MCU

После того как данные будут обработаны, мы обучим модель нейронной сети на основе этих обработанных данных. В этом эксперименте мы решаем задачу бинарной классификации. С помощью данных о температуре и влажности трудно предсказать, выпадет снег или нет.

После обучения модели мы приступим к преобразованию модели в устройство *Raspberry Pi Pico W* с помощью методов, упомянутых на рис. 3, таких как дистилляция знаний, обрезка, квантование и кодирование.

Далее мы сможем внедрить модель в устройство *Raspberry Pi Pico W*. Мы будем использовать библиотеку *TFLiteConverter* для преобразования и кодирования модели перед ее развертыванием непосредственно на устройстве. Предполагая, что обученная модель называется *snow\_forecast\_model.tflite*, приведенный ниже код поможет преобразовать парк моделей в байты перед развертыванием непосредственно в *MCU*.

```
!apt-get update && apt-get -
qq install xxd
!xxd -
i snow_forecast_model.tflite > model.h
!cat model.h
```

```
unsigned char snow_forecast_model_tflite[] = {
0x20, 0x00, 0x00, 0x00, 0x54, 0x46, 0x4c, 0x33, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x14, 0x00, 0x20, 0x00, 0x1c, 0x00, 0x18, 0x00, 0x14, 0x00, 0x10, 0x00,
0x0c, 0x00, 0x00, 0x00, 0x08, 0x00, 0x04, 0x00, 0x14, 0x00, 0x00, 0x00,
0x1c, 0x00, 0x00, 0x00, 0x88, 0x00, 0x00, 0x00, 0xe0, 0x00, 0x00, 0x00,
0x60, 0x02, 0x00, 0x00, 0x70, 0x02, 0x00, 0x00, 0xb0, 0x07, 0x00, 0x00,
0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00,
0x56, 0xfd, 0xff, 0xff, 0x0c, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1c, 0x00, 0x00, 0x00,
0x38, 0x00, 0x00, 0x00, 0x0f, 0x00, 0x00, 0x00, 0x73, 0x65, 0x72, 0x76,
0x69, 0x6e, 0x67, 0x5f, 0x64, 0x65, 0x66, 0x61, 0x75, 0x6c, 0x74, 0x00,
0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x94, 0xff, 0xff, 0xff,
0x07, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x07, 0x00, 0x00, 0x00,
0x64, 0x65, 0x6e, 0x73, 0x65, 0x5f, 0x33, 0x00, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00,
0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x66, 0xfe, 0xff, 0xff, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00,
0x0d, 0x00, 0x00, 0x00, 0x64, 0x65, 0x6e, 0x73, 0x65, 0x5f, 0x32, 0x5f,
0x69, 0x6e, 0x70, 0x75, 0x74, 0x00, 0x00, 0x00, 0x02, 0x00, 0x00, 0x00,
0x34, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0xdc, 0xff, 0xff, 0xff,
0x0a, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x13, 0x00, 0x00, 0x00,
0x43, 0x4f, 0x4e, 0x56, 0x45, 0x52, 0x53, 0x49, 0x4f, 0x4e, 0x5f, 0x4d,
0x45, 0x54, 0x41, 0x44, 0x41, 0x54, 0x41, 0x00, 0x08, 0x00, 0x0c, 0x00,
0x08, 0x00, 0x04, 0x00, 0x08, 0x00, 0x00, 0x09, 0x00, 0x00, 0x00,
0x04, 0x00, 0x00, 0x00, 0x13, 0x00, 0x00, 0x00, 0x6d, 0x69, 0x6e, 0x5f,
0x72, 0x75, 0x6e, 0x74, 0x69, 0x6d, 0x65, 0x5f, 0x76, 0x65, 0x72, 0x73,
0x69, 0x6f, 0x6e, 0x00, 0x0b, 0x00, 0x00, 0x00, 0x7c, 0x01, 0x00, 0x00,
0x74, 0x01, 0x00, 0x00, 0x1c, 0x01, 0x00, 0x00, 0xd4, 0x00, 0x00, 0x00,
```

• Рис. 6. Байтовые данные для модели в *Raspberry Pi Pico W*  
 • Fig. 6. Byte data for the model in *Raspberry Pi Pico W*

На рис. 6 показан пример байтовых данных после использования преобразователя обученной модели. Эти байтовые данные будут поступать на устройство и реализовывать прогнозы в реальном времени для данных, собранных непосредственно с датчика *Raspberry Pi Pico W*.

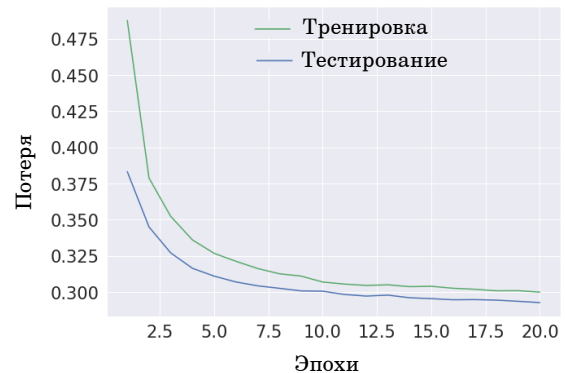
### Оценка модели

На рис. 7 показано значение потерь модели. Величина потерь сходится примерно через 20 эпох. И полученное значение равно 0,29.

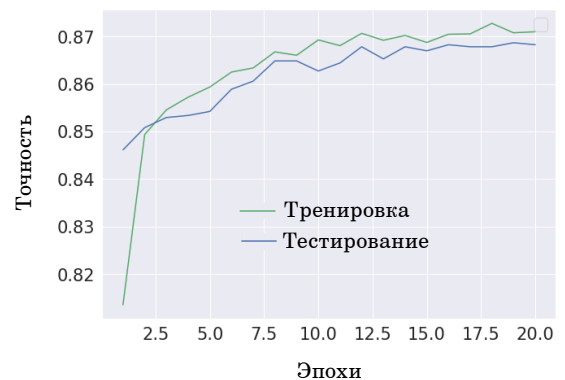
На рис. 8 точность модели составляет около 88,5%; примерно через 20 эпох модель начинает сходиться.

Результаты точности и величина потерь неуклонно сходятся, начиная с 15-й эпохи. Поэтому расхождение между значениями в разные эпохи не очень велико.

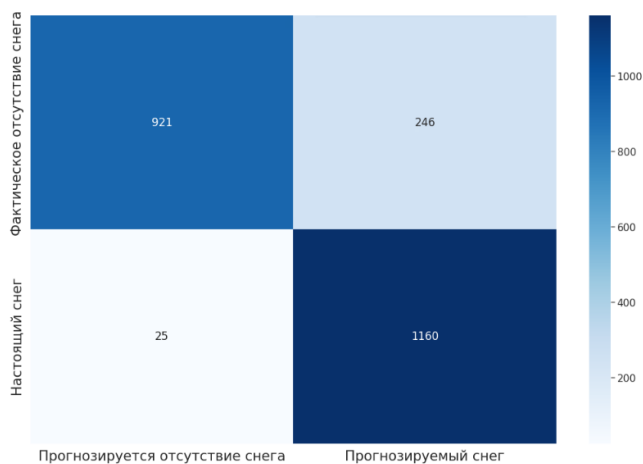
Матрица ошибок модели показана на рис. 9. Точность = 0,885, полнота = 0,979, прецизионность = 0,825 и F-мера = 0,895. Результаты показывают, что точность довольно высока, а резуль-



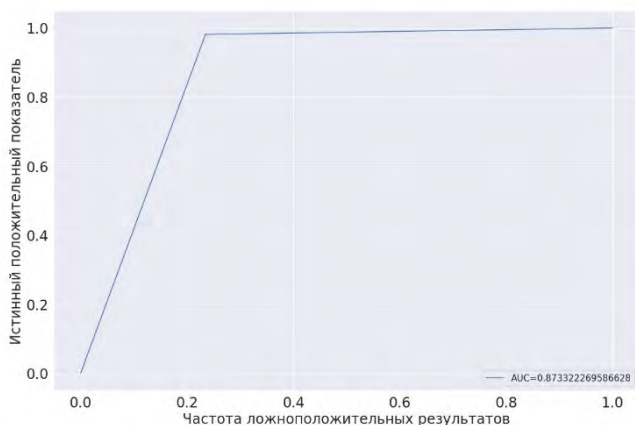
• Рис. 7. Значение потерь модели нейронной сети  
 • Fig. 7. Loss value of the neural network model



• Рис. 8. Точность модели нейронной сети  
 • Fig. 8. Accuracy of the neural network model



- Рис. 9. Матрица неточностей модели
- Fig. 9. Confusion matrix of model



- Рис. 10. Кривая ROC и значение AUC-модели
- Fig. 10. ROC curve and AUC value of the model

таты прогнозирования равномерно распределены по разным меткам.

В целом, результаты свидетельствуют о том, что модель работает хорошо и дает хорошие прогнозы, которые равномерно распределены между различными метками. В экспериментальной части мы развернули простую модель нейронной

сети, результаты классификации относительно высоки (с точностью более 88 %).

На рис. 10 показана ROC (характеристика приемника) кривая классификационной модели. Это модель для задачи бинарной классификации. Бинарная классификационная модель имеет сильное значение AUC (площадь под ROC кривой) 0,873, что свидетельствует о ее высокой способности видеть различия между двумя классами. Это указывает на то, что модель способна сделать точные прогнозы в большинстве случаев. Высокое значение AUC также подразумевает низкую долю ложных положительных и ложных отрицательных результатов, что желательно в многих приложениях. Эта модель является сильным кандидатом для использования в данной задаче классификации на основе ее высокого значения AUC.

## Заключение

*TinyML* создала новый класс фреймворков машинного обучения, предназначенных для экосистемы Интернета вещей с крайне ограниченными ресурсами и устройств, работающих от батарей. Варианты использования *TinyML* становятся доступными во многих сферах. В этом исследовании представлен обзор построения прогностической модели и развертывания ее на устройстве *Raspberry Pi Pico W* с использованием *TinyML*. Это первый шаг к применению моделей искусственного интеллекта к устройствам IoT с ограниченными ресурсами.

В ходе экспериментального процесса модель, развернутая на устройстве *Raspberry*, работает очень быстро и стабильно, поскольку после обучения модели она была преобразована в байтовые данные. В результате процесса развертывания прогностической модели, данные датчиков считываются и передаются сразу в обучающую модель. Таким образом, процесс прогнозирования будет быстрым и будет производиться в режиме реального времени.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dutta L., Bharali S. Tinyml meets iot: A comprehensive survey // Internet of Things. 2021. Vol. 16. P. 100461.
2. Kumar V., Kumar V., Verma V. A microcontroller based online fault detection system. 2015. URL: csjournals.com/IJEE/PFD7-2/1.Vikas.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
3. The extreme edge at the bottom of the Internet of Things: a review / J. Portilla [et al.] // IEEE sensors journal. 2019. Vol. 19, №. 9. P. 3179–3190.
4. Edge computing: Vision and challenges / W. Shi [et al.] // IEEE Internet of Things journal. 2016. Vol. 3, № 5. P. 637–646.
5. Sanchez-Iborra R., Skarmeta A. F. Tinyml-enabled frugal smart objects: Challenges and opportunities // IEEE Circuits and systems magazine. 2020. Vol. 20, № 3. P. 4–18.

6. Bringing machine learning to the deepest IoT edge with TinyML as-a-service / H. Doyu [et al.] // *IEEE IoT Newsl.* 2020. Vol. 11. P. 1–3.
7. Benchmarking tinyml systems: Challenges and direction / C. R. Banbury [et al.] // *arXiv preprint arXiv.* 2020.
8. Zhao C. W., Jegatheesan J., Loon S. C. Exploring Iot application using raspberry Pi // *International journal of computer networks and applications.* 2015. Vol. 2, № 1. P. 27–34.
9. Vujović V., Maksimović M. Raspberry Pi as a wireless sensor node: performances and constraints // *37<sup>th</sup> international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO).* IEEE. 2014. P. 1013–1018.
10. Haq: Hardware-aware automated quantization with mixed precision / K. Wang [et al.] // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition.* 2019. P. 8612–8620.
11. Sparse: Sparse architecture search for cnns on resource-constrained microcontrollers / I. Fedorov [et al.] // *Advances in neural information processing systems.* 2019. Vol. 32. P. 1–13.
12. Lai L., Suda N., Chandra V. Cmsis-nn: Efficient neural network kernels for arm cortex-m cpus // *arXiv preprint arXiv:1801.06601.* 2018.
13. Learning both weights and connections for efficient neural network / S. Han [et al.] // *Advances in neural information processing systems.* 2015. Vol. 28.
14. Polino A., Pascanu R., Alistarh D. Model compression via distillation and quantization // *arXiv preprint arXiv:1802.05668.* 2018.
15. Han S., Mao H., Dally W. J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding // *arXiv preprint arXiv:1510.00149.* 2015.
16. Tensorflow lite micro: Embedded machine learning for tinyml systems / R. David [et al.] // *Proceedings of machine learning and systems.* 2021. Vol. 3. P. 800–811.

## REFERENCES

1. Dutta L., Bharali S. Tinyml meets iot: A comprehensive survey. *Internet of Things.* 2021;16:100461.
2. Kumar V., Kumar V., Verma V. A microcontroller based online fault detection system. 2015. Available from: [csjournals.com/IJEE/PFD7-2/1.Vikas.pdf](http://csjournals.com/IJEE/PFD7-2/1.Vikas.pdf) [Accessed 26 December 2022].
3. Portilla J., Mujica G., Lee J. S., Riesgo T. The extreme edge at the bottom of the Internet of Things: A review. *IEEE sensors journal.* 2019;19(9):3179–3190.
4. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things journal.* 2016;3(5):637–646.
5. Sanchez-Iborra R., Skarmeta A. F. Tinymml-enabled frugal smart objects: Challenges and opportunities. *IEEE circuits and systems magazine.* 2020;20(3):4–18.
6. Doyu H., Morabito R., Höller J. Bringing machine learning to the deepest IoT edge with TinyML as-a-service. *IEEE IoT Newsl.* 2020;11:1–3.
7. Banbury C. R., Reddi V. J., Lam M., et al. Benchmarking tinyml systems: Challenges and direction. *arXiv preprint arXiv.* 2020.
8. Zhao C. W., Jegatheesan J., Loon S. C. Exploring Iot application using raspberry Pi. *International journal of computer networks and applications.* 2015;2(1):27–34.
9. Vujović V., Maksimović M. Raspberry Pi as a Wireless Sensor node: Performances and constraints. *37<sup>th</sup> international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO).* IEEE. 2014, pp. 1013–1018.
10. Wang K., Liu Z., Lin Y., Lin J., Han S. Haq: Hardware-aware automated quantization with mixed precision. *Proceedings of the IEEE. CVF conference on computer vision and pattern recognition.* 2019, pp. 8612–8620.
11. Fedorov I., Adams R. P., Mattina M., Whatmough P. Sparse: Sparse architecture search for cnns on resource-constrained microcontrollers. *Advances in neural information processing systems.* 2019;32:1–13.
12. Lai L., Suda N., Chandra V. Cmsis-nn: Efficient neural network kernels for arm cortex-m cpus. *arXiv preprint arXiv:1801.06601.* 2018.
13. Han S., Pool J., Tran J., Dally W. Learning both weights and connections for efficient neural network. *Advances in neural information processing systems.* 2015;28.
14. Polino A., Pascanu R., Alistarh D. Model compression via distillation and quantization. *arXiv preprint arXiv:1802.05668.* 2018.
15. Han S., Mao H., Dally W. J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding. *arXiv preprint arXiv:1510.00149.* 2015.

16. David R., Duke J., Jain A. et al. Tensorflow lite micro: Embedded machine learning for tinyml systems. Proceedings of machine learning and systems. 2021;3:800–811.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**До Фук Хао**, магистр компьютерных наук, аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича; преподаватель Архитектурного университета Дананга.

Область научных интересов – искусственный интеллект, ML, DL и его применение в различных областях, таких как сети, блокчейн.

**Ле Чан Дык**, кандидат технических наук, преподаватель факультета информационных технологий Университета науки и технологий – Университета Дананга, Дананг, Вьетнам.

Область научных интересов – Интернет вещей, беспроводные сети, сетевая безопасность, QoS, WLAN, программно-определяемые сети.

**Зуйков Максим Артемович**, студент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича.

Область научных интересов – искусственный интеллект, машинное обучение, беспроводные сети и различные области их применения.

**Берёзкин Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича.

Область научных интересов – компьютерное зрение, машинное обучение и помехоустойчивое кодирование.

**Киричэк Руслан Валентинович**, доктор технических наук, доцент, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича, профессор кафедры программной инженерии и вычислительной техники.

Область научных интересов – Интернет вещей, беспроводные сенсорные сети, летающие сети, сетевая безопасность, защита от преднамеренных электромагнитных воздействий, тестирование сетей и устройств телекоммуникаций, идентификация на базе архитектуры цифровых объектов, машинное обучение для встраиваемой электроники, идентификация Интернет вещей на базе архитектуры цифровых объектов.

Поступила в редакцию 27.01.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

**Do Phuc Hao**, M. Sc. in Computer science, Postgraduate at the Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications; Lecturer at the Danang Architecture University.

Research interest – AI, ML, D and its application in different fields like network, blockchain.

**Le Tran Duc**, PhD in Technical Sciences, Lecturer at the Information Technology Faculty, The University of Science and Technology – The University of Danang, Danang, Vietnam.

Research interest – Internet of Things, wireless network, network security, QoS, WLAN, Software-defined networking.

**Zuikov Maksim A.**, Student at the Faculty of ICSS, Department of Software Engineering, The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications.

Research interests – artificial intelligence, machine learning, wireless networks and various areas of their application.

**Beryozkin Aleksandr A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Computing, The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications.

Research interests – computer vision, machine learning and error-correcting coding.

**Kirichkek Ruslan V.**, Rector, D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Computer Science and Technology, The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications.

Research interests – Internet of Things, wireless sensor networks, flying networks, network security, protection against intentional electromagnetic influences, testing of networks and telecommunications devices, identification based on the architecture of digital objects, machine learning for embedded electronics, identification of the Internet of things based on the architecture of digital objects.

Received 27.01.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Проблемы обеспечения интероперабельности при интеграции действующих автоматизированных систем управления и информационных систем

**Михаил Юрьевич Охтилев<sup>1</sup>**

oxt@mail.ru, orcid.org/0000-0001-5017-3768

**Борис Владимирович Соколов<sup>1</sup>**

sokol@iias.spb.su, orcid.org/0000-0002-2295-7570

**Владислав Николаевич Коромысличенко<sup>1</sup>**

jak2006@mail.ru

**Павел Алексеевич Охтилев<sup>1</sup>**

p.oxt@mail.ru, orcid.org/0000-0003-3923-3218

**Александр Эдуардович Зянчурин<sup>1</sup>**

✉ zwilas@gmail.com

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

**Аннотация.** Рассматривается специфика обеспечения интероперабельности действующих и модернизируемых автоматизированных систем управления (АСУ) и информационных систем (ИС). Показано, что перспективы обеспечения интероперабельности лежат в основе применения интеллектуальных систем, ядром которых является модель предметной области. В качестве ключевых элементов обеспечения интероперабельности анализируются онтологические системы как способ интеграции данных и знаний и единое информационное пространство как практическое воплощение интероперабельности. Для обеспечения реализации такого подхода в основу функциональности АСУ и ИС должны быть положены принципы декларативного проектирования прикладного программного обеспечения и реализации исполнительных систем, осуществляющих вычисления по заложенным в систему знаниям.

**Ключевые слова:** интероперабельность, модель предметной области, онтология, данные, знания, единое информационное пространство, прикладное программное обеспечение, искусственный интеллект

**Для цитирования:** Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Коромысличенко В. Н., Охтилев П. А., Зянчурин А. Э. Проблемы обеспечения интероперабельности при интеграции действующих автоматизированных систем управления и информационных систем // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 76–83. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-76-83.

Original article

## Problems of ensuring interoperability in the integration of existing automated control systems and information systems

**Mikhail Yu. Okhtilev<sup>1</sup>**

oxt@mail.ru

**Boris V. Sokolov<sup>1</sup>**

sokol@iias.spb.su

**Vladislav N. Koromyslichenko<sup>1</sup>**

jak2006@mail.ru

**Pavel A. Okhtilev<sup>1</sup>**

p.oxt@mail.ru

**Alexander E. Zyanchurin<sup>1</sup>**

✉ zwilas@gmail.com

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

**Abstract.** The article discusses the specifics of ensuring the interoperability of existing and modernized automated control systems and information systems. It is shown that the prospects for ensuring interoperability underlie the use of intelligent systems, the core of which is the domain model. As a key element of ensuring interoperability, ontological systems are analyzed as a way of integrating data and knowledge, and a unified information domain as a practical embodiment of interoperability. To ensure the implementation of such an approach, the principles of declarative design of application software and the implementation of executive systems that perform calculations based on the knowledge embedded in the system should be based on the functionality of automated control systems and information systems.

**Keywords:** interoperability, domain model, ontology, data, knowledge, unified information domain, applied software, Artificial Intelligence

**For citation:** Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Koromyslichenko V. N., Okhtilev P. A., Zyanchurin A. E. Problems of ensuring interoperability in the integration of existing automated control systems and information systems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):76–83. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-76-83.

## Введение

Известно, что способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена, называется интероперабельностью. Обеспечение интероперабельности является одной из главных основ формирования информационного общества [1]. Интероперабельность служит ключевым фактором реализации единого информационного пространства (ЕИП) в экономике, промышленности, обороноспособности, ракетно-космической отрасли и других наукоемких областях.

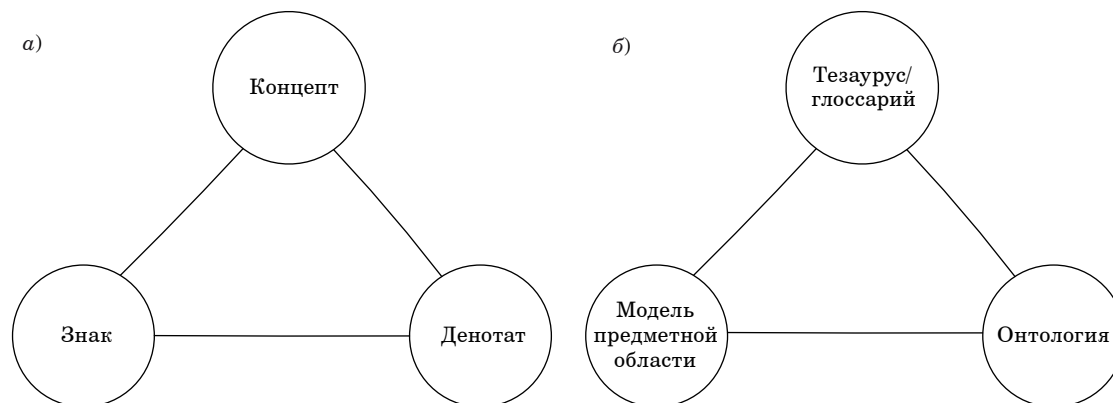
## Перспективы обеспечения интероперабельности

В основе интероперабельности лежат не только информационно-телекоммуникационные стандарты, но и системы, ядром которых является база знаний (БЗ), описанная на проблемно-ориентированном языке представления знаний (языке так называемого сверхвысокого уровня, или модель предметной области (ПрО)), и которые называют интеллектуальными [2–5]. Рассмотрение современных интеллектуальных систем показывает, что перспективным направлением обеспечения интероперабельности автоматизированных систем управления (АСУ) и информационных систем (ИС) является использование совокупности взаимосвязанных онтоло-

гий в виде онтологической системы как способа интеграции и согласования разнородных данных и знаний. При этом в основу реализации такой системы могут быть положены аппаратно-программные (программные) реализации семантических медиаторов (предметных посредников). Кроме того, перспективная реализация такого подхода видится именно в мультиагентной интерпретации информационного взаимодействия АСУ и ИС.

Традиционно концептуальное моделирование любой ПрО предполагает выявление сущностей ПрО и отношений между ними. Но в то же время в основе этапа моделирования ПрО при создании любых АСУ и ИС лежит положение о том, что жизненный цикл автоматизированной системы начинается с формирования словаря ПрО [3, 6, 7]. Эта особенность характеризуется известным треугольником Г. Фреге и дополнением А. Нариньяни (рис. 1), указывающим на прямую взаимосвязь реальных объектов (денотатов), их концептов (понятий, т. е. десигнатов) и знаков (синтаксических имен или слов) [2, 8, 9].

Если концептуальные схемы инкапсулируют информацию о типах сущностей в ПрО, то онтологии связаны с определениями понятий, заданием ограничений на них. Их совместное использование называют онтолого-управляемым моделированием (или онтологическим аннотированием моделей), указывая на то, что сущности ПрО являются индивидами определенных категорий (понятий), а отношения между ними характеризуются отношениями между концептами [10–12].



• Рис. 1. Треугольник Г. Фреге (а) и интерпретация А. Нариньяни (б)  
 • Fig. 1. Triangle G. Frege (a) and interpretation by A. Narignani (b)

В связи с этим онтологическую модель можно называть семантической, а ее конкретную интерпретацию – концептуальной моделью ПрО. В работах [9, 13] отмечается, что необходимо ввести построение онтологий как предварительный этап проектирования всех перспективных автоматизированных систем и особенно традиционных систем обработки данных, так как технологии проектирования последних предполагают разработку их спецификаций.

Практическое назначение онтологической системы в рассматриваемом контексте состоит в том, чтобы создать иерархию согласованных спецификаций моделей информационных потоков, концептуальных схем источников данных, моделей согласованных вычислительных задач, которые заданы в рамках уже существующих и унаследованных АСУ и ИС, имеют различную аналитическую и логическую природу, различное практическое приложение и в программной реализации выполнены на разных платформах. Таким образом, онтологическая система становится унифицирующей семантической надстройкой поверх разнородного информационного обеспечения существующих АСУ и ИС и обеспечивает возможности их совместного функционирования, организации передачи семантически значимой информации и информационного взаимодействия.

### Единое информационное пространство – базовый фактор реализации интероперабельности

Единое информационное пространство представляет собой систему, основанную на использовании совокупности баз и банков данных и знаний, информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам, обеспечивающую информационную среду и информационное взаимодействие АСУ и ИС для выполнения их целевых задач по совместному применению [9, 14–16].

Иными словами, ЕИП складывается из следующих существенных компонент [9, 17]:

- информационные ресурсы, содержащие данные, сведения и знания, зафиксированные на соответствующих носителях информации (существенную роль в формировании ЕИП в рассматриваемой задаче играют метаданные и технологии их обработки);

- организационные структуры, обеспечивающие функционирование и развитие ЕИП, в частности, сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации;

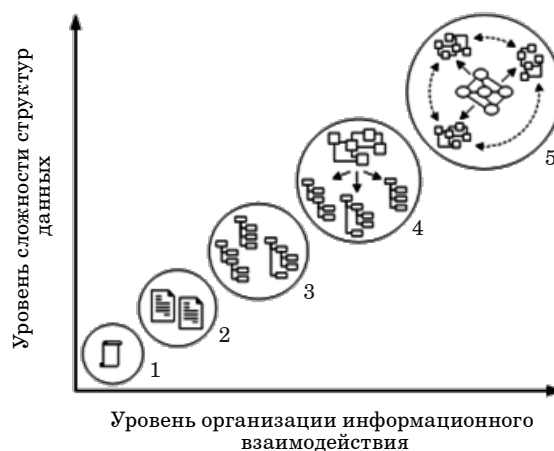
- средства информационного взаимодействия, обеспечивающие доступ к информационным ресурсам на основе соответствующих информационных и телекоммуникационных технологий (ИКТ), включающие программно-технические средства и организационно-нормативные документы, регламентирующие информационно-технологическое взаимодействие.

Удачный пример иллюстрации повышения сложности информационного взаимодействия с ростом объемов информации и сложности организационно-технических структур АСУ представлен в работе [18] (рис. 2).

Таким образом, реализуемость и эффективность совместного функционирования современных сложно структурированных АСУ и ИС существенным образом зависит от формирования ЕИП, основанного на интеллектуальных технологиях, в рамках которого системы должны иметь возможность оперативного обмена данными и знаниями, составляющего основу успешного совместного функционирования. Однако вопрос теоретических основ формирования такого ЕИП остается открытым.

Необходимо отметить, что в заданном контексте ЕИП становится не просто средой обмена информацией, но средой единой системы БЗ, контекстных правил их применения, унификации терминологии и семантики разнородных языковых структур, на базе которых функционируют АСУ и ИС. Это, прежде всего, означает, что при реализации такого ЕИП необходимо обеспечить сквозную технологию интеграции данных и приложений, называемых, в более узком смысле, в зарубежных публикациях *Enterprise Information Integration (EII)* и *Enterprise Application Integration (EAI)*.

Интеграция данных и приложений является актуальной задачей при формировании ЕИП



• Рис. 2. Уровни организации информационного взаимодействия

• Fig. 2. Levels of organization of information interaction

автоматизированных систем, связанных единой ПрО, общими задачами и разделяемой информацией. Такая информация требует совместной обработки, обобщения и анализа для формирования выводов о функционировании комплекса в целом. «Наиболее часто эта задача встречается при агрегации данных – учетные системы генерируют стандартные периодические отчеты, которые являются входными данными для других систем» [19]. Задача технологий интеграции состоит в преодолении неоднородности, присущей АСУ и ИС, которые создавались и создаются на разных аппаратных платформах, используя разную функциональность, различные типы и модели данных. Их компоненты различаются по автономности, имеют различную производительность и др. [9, 20].

Формирование ЕИП на базе технологий интеграции данных и приложений предполагает построение модели интегрированной информационной среды (ИИС), где под интеграцией данных понимается обеспечение единого унифицированного согласованного по моделям данных интерфейса для доступа к некоторой совокупности неоднородных независимых источников данных [10, 21].

Характерные черты модели ИИС представлены в табл. 1 [9].

Интеграцию с точки зрения программной поддержки можно разделить на три вида: процедурный, декларативный, смешанный (или процедурно-декларативный). Сравнительный анализ видов интеграции представлен в табл. 2 [22].

В концепции ЕИП предусматривается, что в роли информационных ресурсов АСУ и ИС выступают не только данные, но и различные приложения [22]. В таком случае создаются предметно-ориентированные модули обработки данных,

общающиеся между собой. Такой подход соответствует распределенной одноранговой архитектуре взаимодействия АСУ и ИС. В заданном контексте это означает, что интероперабельность сводится не только к интеграции данных, но и к обеспечению функциональной совместимости по данным. Реализация функциональной совместимости на основе интеллектуальных технологий предполагает, что в процессе информационного взаимодействия неких двух систем не просто изменяется ход функционирования одной из них по полученным данным и по доступному сценарию обработки данных, но может измениться в целом структурно-функциональный облик самой системы [9, 23–25]. Система может получить новые задачи, новые цели, новый порядок их реализации. Именно этот аспект является решающим в обеспечении эмерджентного эффекта совместного функционирования многоагентной системы, обладающей свойством интероперабельности.

Таким образом, можно сделать следующие выводы о двух взаимодополняющих технологиях: используя ЕИП, можно объединить источники данных, а с помощью интеграции приложений ЕАИ объединяются структурно-функциональные модели АСУ и ИС [17, 20, 22].

Для обеспечения реализации такого подхода в основу функциональности АСУ и ИС должны быть положены принципы декларативного проектирования прикладного ПО и реализации исполнительных систем, осуществляющих вычисления по заложенным в систему знаниям. Говоря простыми словами, любой алгоритм, реализованный в АСУ и ИС, так же как и любая модель их данных, должны быть представимы декларативными спецификациями в виде интерпретируемых исполнительными системами наборов дан-

- Таблица 1. Характерные черты модели ИИС
- Table 1. Characteristic features of the IIS model

Черта ИИС	Содержательное пояснение
Предметная ориентированность	Означает компоновку пулов информации по определенным ПрО или целям в виде соответствующих согласованных моделей
Интегрированность	Предусматривает сбор и обработку информации по определенной ПрО из различных источников и превращение ее в организованный по заданным правилам, подчиненным определенной цели, массив в виде гиперкуба
Неизменчивость	Результаты обработки данных в ИИС подлежат только накоплению в заданном порядке и при необходимости предполагают только чтение
Поддержка хронологии	Заключается в привязке данных ко времени. Информация, содержащаяся в хранилище, рассматривается в историческом аспекте. Используют следующие типы привязки ко времени: – к моменту совершения события, – к моменту фиксации изменения в ИС, – комбинированные методы, – к моментам прохождения данных по логическим цепочкам



- Таблица 2. Виды программной поддержки интеграции информационных ресурсов
- Table 2. Types of software support for the integration of information resources

Вид интеграции	Содержательное пояснение	Достоинства	Недостатки
Процедурный	Предполагает жесткое кодирование процедур интеграции, основанное на конкретных моделях данных	Отсутствие ограничений по применению к БД различных структур и моделей	Необходимость реализации модулей под каждый источник данных; сложность сопровождения; недостаточная гибкость; неустойчивость к изменению модели данных
Декларативный	Соотносит модели данных между собой на уровне описания, обрабатываемого стандартным модулем объединения, не зависящим от моделей данных	Максимальная универсальность; устойчивость к изменению модели данных; минимальные средние накладные расходы на каждый источник данных	Ограниченная область применимости, так как требуется использование соответствующей универсальной метамодели во всех источниках данных
Смешанный	Использует процедурный метод для интерпретации данных каждого из источников в целях перевода данных в универсальную метамодель более высокого уровня, в которой модели данных описываются однообразно	Обладает преимуществами и декларативного, и процедурного подходов	Лишен недостатков декларативного и процедурного подходов

ных. Указанный подход может быть реализован на основе унифицированных онтологических полимодельных комплексов, обеспечивающих всю систему едино интерпретируемой терминологией. При этом задание таких исполнимых спецификаций должно осуществляться экспертами Про на проблемно-ориентированных языках с визуальной (графической) нотацией (с учетом положения, что навыки программирования у экспертов-технологов отсутствуют) [26–28].

## Заключение

Обеспечение интероперабельности действующих АСУ и ИС возможно в рамках единого ин-

формационного пространства с использованием совокупности взаимосвязанных онтологий в виде онтологической системы как способа интеграции и согласования разнородных данных и знаний. Однако необходимо отметить, что обеспечение полной функциональной совместимости возможно только при условии интеграции в существующие АСУ и ИС необходимой функциональности исполнительных систем. В условиях отсутствия такой возможности совместимость может быть обеспечена только по данным на основе предметных посредников – семантических медиаторов. В целом можно отметить, что существующие программные продукты не ориентированы на совместную семантическую интеграцию данных и приложений [9].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
2. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев Д. И. Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
3. Гуцин А. Н. Основы представления знаний: учеб. пособие. М.: Балл. гос. техн. ун-т, 2007. 31 с.
4. Льюгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии методы решения сложных проблем. 4-е изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 864 с.
5. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход / пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1408 с.

6. *Боргест Н. М.* Онтология проектирования: теоретические основы. Ч. 1: Понятия и принципы: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2010. 92 с.
7. *Охтилев М. Ю., Коромысличенко В. Н., Охтилев П. А.* Программная инженерия. Инженерный подход: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 163 с.
8. *Поспелов Д. А.* Искусственный интеллект: в 3 кн. Кн. 2: Модели и методы: справочник. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
9. *Охтилев П. А.* Алгоритмы и онтологические модели информационно-аналитической поддержки процессов создания и применения космических средств: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПИИРАН, 2019. 416 с.
10. *Когаловский М. Р.* Методы интеграции данных в информационных системах. 2010. URL: [http://www.ipr-ras.ru/old\\_site/articles/kogalov10-05.pdf](http://www.ipr-ras.ru/old_site/articles/kogalov10-05.pdf) (дата обращения: 05.09.2022).
11. *Когаловский М. Р.* Перспективные технологии информационных систем. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2018. 287 с.
12. *Когаловский М. Р.* Системы доступа к данным, основанные на онтологиях // Программирование. 2012. № 4. С. 55–77.
13. *Найханова Л. В.* Основные типы семантических отношений между терминами предметной области // Известия высш. учеб. завед. Поволжский регион. Технические науки: науч.-практ. журнал. 2008. № 1. С. 62–71.
14. *Бахмут А. Д., Охтилев М. Ю., Охтилев П. А.* Модель интеграции информационных ресурсов производственного цикла РН «Союз-2» на основе онтологического доступа к данным // Научная сессия ГУАП: сб. докл. науч. сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики: в 3 ч. Ч. II: Технические науки. СПб.: ГУАП, 2019. С. 295–300.
15. *Охтилев П. А.* Интеллектуальный комплекс автоматизированного проектирования систем информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 963–971.
16. Models, algorithms and monitoring system of the technical condition of the launch vehicle «Soyuz-2» at all stages of its life cycle / A. Bakhmut, A. Kljucharjov, A. Krylov, M. Okhtilev, P. Okhtilev, A. Ustinov, A. Zyanchurin. Springer International publishing AG, part of Springer Nature, 2019. P. 288–297.
17. *Марков Н. Г.* Инструментальные средства для создания единого информационного пространства промышленных компаний // Информационное общество. 2014. № 3. С. 53–62.
18. Information interaction data models / A. B. Korchagin, I. G. Lis'ikh, D. A. Nikiforov, R. L. Sivakov // International journal of open information technologies. 2017. Vol. 5, № 3. P. 49–54.
19. *Биряльцев Е. В., Гусенков А. М.* Интеграция реляционных баз данных на основе онтологий // Ученые записки Казан. гос. ун-та. Сер.: Физико-математ. науки. 2007. Т. 149. Кн. 2. С. 13–34.
20. *Черняк Л.* Интеграция данных: синтаксис и семантика // Открытые системы. СУБД. Электрон. журн. № 10. URL: [www.osp.ru](http://www.osp.ru) (дата обращения: 26.12.2022).
21. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1: Базовая модель. М.: МНИЦ ГК РФ, 2006. 58 с.
22. *Божинский И. А.* Методы и технологии интеграции информационных систем и распределенных баз данных // Радиоэлектроника и информатика. 2015. № 2. С. 30–36.
23. *Охтилев М. Ю.* Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизированных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов. СПб.: ГУАП, 2018. 261 с.
24. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальная информационная технология комплексной автоматизации процессов мониторинга и управления подвижными объектами // Гироскопия и навигация. 2006. № 2 (53). С. 120–130.
25. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
26. *Вендоров А. М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. М.: Финансы и статистика, 1998. 176 с.
27. *Гаазе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А., Аверкин А. Н.* Структура исследований в области искусственного интеллекта. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. 256 с.
28. Обзор состояния исследований задач автоматизированного проектирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений при управлении сложными объектами на всех этапах их жизненного цикла / П. А. Охтилев, А. Д. Бахмут, В. Н. Коромысличенко, А. В. Крылов, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, А. В. Устинов, А. Э. Зянчурин // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XX Междунар. конф. Самара, 2018. С. 307–313.

## REFERENCES

1. GOST R 55062-2012. Information technologies. Industrial automation systems and their integration. Interoperability. Key points. Moscow: Standardinform; 2018. 12 p. (In Russ.).
2. Gavrilova T. A., Kudryavtsev D. V., Muromtsev D. I. Knowledge engineering. Models and methods: textbook. SPb.: Lan'; 2016. 324 p. (In Russ.).
3. Gushchin A. N. Fundamentals of knowledge representation: textbook. Moscow: Ball. state tech. un-t; 2007. 31 p. (In Russ.).
4. Luger J. F. Artificial intelligence: strategies for solving complex problems; trans. from English. 4<sup>th</sup> ed. Moscow: Williams Publishing House; 2003. 864 p. (In Russ.).
5. Russell S., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach; trans. from English. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Williams; 2006. 1408 p. (In Russ.).
6. Borgest N. M. Ontology of design: theoretical foundations. Part 1: Concepts and principles: a tutorial. Samara: Publishing house of SSAU; 2010. 92 p. (In Russ.).
7. Okhtilev M. Yu., Koromyslichenko V. N., Okhtilev P. A. Software engineering. Engineering approach: textbook. SPb.: SUAI; 2021. 163 p. (In Russ.).
8. Pospelov D. A. Artificial intelligence. In three books. Book 2. Models and methods: a reference book. Moscow: Radio and communication; 1990. 304 p. (In Russ.).
9. Okhtilev P. A. Algorithms and ontological models of information and analytical support for the processes of creation and use of space facilities: dis. ... cand. tech. sciences. SPb.: SPIIRAS; 2019. 416 p. (In Russ.).
10. Kogalovsky M. R. Methods of data integration in information systems. 2010. Available from: [http://www.ipr-ras.ru/old\\_site/articles/kogalov10-05.pdf](http://www.ipr-ras.ru/old_site/articles/kogalov10-05.pdf) [Accessed 05 September 2022].
11. Kogalovsky M. R. Perspective technologies of information systems. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: DMK Press; 2018. 287 p. (In Russ.).
12. Kogalovsky M. R. Data access systems based on ontologies. Programming. 2012;(4):55–77. (In Russ.).
13. Naykhanova L. V. The main types of semantic relations between the terms of the subject area. Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences: scientific and practical journal. 2008;(1):62–71. (In Russ.).
14. Bakhmut A. D., Okhtilev M. Yu., Okhtilev P. A. Model of integration of information resources of the production cycle of the launch vehicle “Soyuz-2” based on ontological access to data. Scientific session of the SUAI. Collection of reports of the scientific session dedicated to the World Day of Aviation and Cosmonautics: in 3 parts. P. II: Technical sciences. SPb.: SUAI; 2019, pp. 295–300. (In Russ.).
15. Okhtilev P. A. Intelligent complex of computer-aided design of systems of information and analytical support for the life cycle of complex objects. Izvestiya vuzov. Instrumentation. 2018;61(11):963–971. (In Russ.).
16. Bakhmut A. D., Kljucharjov A. A., Krylov A. V. et al. Models, algorithms and monitoring system of the technical condition of the launch vehicle “Soyuz-2” at all stages of its life cycle. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2019, pp. 288–297.
17. Markov N. G. Tools for creating a single information space for industrial companies. Information society. 2014;(3):53–62. (In Russ.).
18. Korchagin A. B., Lis'ikh I. G., Nikiforov D. A., Sivakov R. L. Information interaction data models. International journal of open information technologies. 2017;5(3):49–54.
19. Biryaltsev E. V., Gusenkov A. M. Integration of relational databases based on ontologies. Uchetnye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Physical and mathematical sciences. 2007;149(2):13–34. (In Russ.).
20. Chernyak L. Data integration: syntax and semantics. Open systems. DBMS. Electronic journal. No. 10. Available from: [www.osp.ru](http://www.osp.ru) [Accessed 26 December 2022].
21. GOST R ISO/IEC 7498-1-99. Information technology. The relationship of open systems. Base reference model. P. 1: Basic model. Moscow: MNITs GK RF; 2006. 58 p. (In Russ.).
22. Bozhinsky I. A. Methods and technologies for integrating information systems and distributed databases. Radioelectronics and informatics. 2015;(2):30–36. (In Russ.).
23. Okhtilev M. Yu. Artificial intelligence systems and their application in automated systems for monitoring the state of complex organizational and technical objects. SPb.: SUAI; 2018. 261 p. (In Russ.).
24. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intelligent information technology for complex automation of monitoring and control of moving objects. Gyroscopy and navigation. 2006;(53):120–130. (In Russ.).
25. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intelligent technologies for monitoring the state and controlling the structural dynamics of complex technical objects. Moscow: Nauka; 2006. 410 p. (In Russ.).
26. Vendorov A. M. CASE-technologies. Modern methods and means of designing information systems. Moscow: Finance and statistics; 1998. 76 p. (In Russ.).
27. Gaaze-Rapoport M. G., Pospelov D. A., Averkin A. N. The structure of research in the field of artificial intelligence. Explanatory dictionary of artificial intelligence. Moscow: Radio and communication; 1992. 256 p. (In Russ.).

28. Okhtilev P. A., Bakhmut A. D., Koromyslichenko V. N. et al. Review state of research of problems of computer-aided design of intelligent decision support systems in the management of complex objects at all stages of their life cycle. Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XX International conference. Samara; 2018, pp. 307–313. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Охтилев Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – теория программирования (Computer Science), теория алгоритмов, системы реального времени, математическая логика, математическая лингвистика, системы искусственного интеллекта, системы поддержки принятия решений.

**Соколов Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – разработка методологических и методических основ решения проблем адаптивного структурного-функционального синтеза и проактивного управления СОТО.

**Коромысличенко Владислав Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – программная инженерия, функциональное программирование.

**Охтилев Павел Алексеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – программная инженерия, интеллектуальные технологии, высоконагруженные приложения, информационно-аналитическое обеспечение.

**Зянчурин Александр Эдуардович** – ассистент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – программная инженерия, модели и алгоритмы автоматизированного проектирования программного обеспечения информационно-аналитических систем поддержки принятия решений при управлении сложными объектами.

**Okhtilev Mikhail Yu.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Head at the Department of Computer Technologies and Software Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – programming theory (Computer Science), theory of algorithms, real-time systems, mathematical logic, mathematical linguistics, artificial intelligence systems, decision support systems.

**Sokolov Boris V.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Computer Technologies and Software Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – development of methodological and methodological foundations for solving the problems of adaptive structural-functional synthesis and proactive control of COTO.

**Koromyslichenko Vladislav N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Technologies and Software Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – software engineering, functional programming.

**Okhtilev Pavel A.**, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Computer Technologies and Software Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – software engineering, intelligent technologies, high-load applications, information and analytical support.

**Zyanchurin Aleksandr E.**, Assistant at the Department of Computer Technologies and Software Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – software engineering, models and algorithms for computer-aided design of software for information and analytical decision support systems in the management of complex objects.

Поступила в редакцию 27.01.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 27.01.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Сравнительный анализ концепций построения тяжелых экранопланов Pelican ULTRA, Liberty Lifter и «Орлан»

**Александр Владимирович Небылов<sup>1</sup>**

✉ nebylov@aanet.ru, orcid.org/0000-0001-5168-3436

**Владимир Александрович Небылов<sup>1</sup>**

vladnebylov@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1449-6898

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

**Аннотация.** В статье критически анализируются три концепции построения больших экранопланов – двух американских и одного российского. Сравниваются их достоинства и недостатки по критериям топливной экономичности, скорости движения, регулярности рейсов, показателям мореходности, требованиям к инфраструктуре. Рассматриваются варианты колесного шасси, снижающие требуемую для взлета мощность стартовых двигателей, а также взлет с воды и посадка на воду. Предлагается и обоснуется перечень новых миссий, которые тяжелый экраноплан может выполнить лучше других транспортных аппаратов. Исследуется инновационная привлекательность экранопланов. Обоснуется необходимость установки на тяжелом экраноплане интеллектуальной системы автоматического управления движением, прототип которой был создан 40 лет назад. По опыту прошлых лет утверждается, что для создания совершенной системы автоматического управления финансирование должно составлять не менее 1/10 от общего объема финансирования создания экраноплана.

**Ключевые слова:** экраноплан, зона экранного эффекта, технико-экономическая транспортная эффективность

**Благодарности.** Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 23-29-00320.

**Для цитирования:** Небылов А. В., Небылов В. А. Сравнительный анализ концепций построения тяжелых экранопланов Pelican ULTRA, Liberty Lifter и «Орлан» // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 84–97. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-84-97.

Original article

## Comparative analysis of the concepts of heavy ekranoplanes Pelican ULTRA, Liberty Lifter and «Orlan» construction

**Alexander V. Nebylov<sup>1</sup>**

✉ nebylov@aanet.ru, orcid.org/0000-0001-5168-3436

**Vladimir A. Nebylov<sup>1</sup>**

vladnebylov@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1449-6898

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

**Abstract.** The article critically analyzes three concepts of building large ekranoplanes – two American and one Russian. Their advantages and disadvantages are compared according to the criteria of fuel efficiency, cruise and maximal speed, regularity of flights, seaworthiness indicators and infrastructure requirements. Variants of a wheeled chassis are considering, which reduce the required power (trust) of the starting engines required for take-off, especially for take-off from water and landing on water. A list of new missions that a heavy ekranoplane can perform better than other transport vehicles is justified. The innovative attractiveness of ekranoplanes is investigated. The necessity of installing an intelligent automatic motion control system, which prototype was created 40 years ago, is substantiated. According to the experience of past years, in order to create a perfect automatic control system, funding should be not less than 1/10 of the total funding for the creation of heavy ekranoplane.

**Keywords:** ekranoplane, ground effect zone, technical and economic transport efficiency

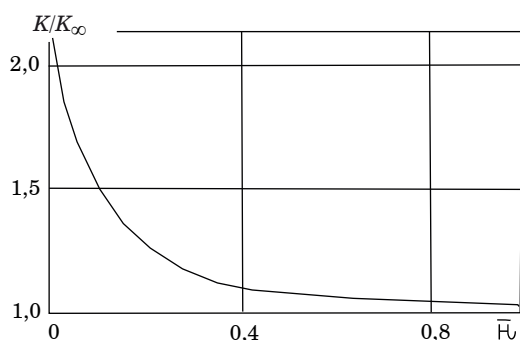
**Acknowledgements.** The research was supported by the Russian Science Foundation no 23-29-00320.

**For citation:** Nebylov A. V., Nebylov V. A., Comparative analysis of the concepts of heavy ekranoplanes Pelican ULTRA, Liberty Lifter and «Orlan» construction. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):84–97. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-84-97.

### Введение

История развития экранопланов насчитывает уже более 50 лет, но только сейчас наступил кри-

тический период для внедрения в практику перевозок грузов и пассажиров новых транспортных технологий. Удачно сложились две инновационные тенденции: появление новых технических резуль-



• *Рис. 1. Нормированное значение аэродинамического качества в зависимости от высоты движения*  
 • *Fig. 1. Normalized value of lift-to-drag ratio depending on flight altitude*

татов, позволяющих обеспечить высокоскоростной полет на сверхмалых высотах, и появление новых транспортных задач, успешное решение которых требует именно такого режима движения.

Экраноплан использует при движении (в полете) экранный эффект, заключающийся в резком повышении подъемной силы крыла при его движении вблизи подстилающей поверхности. Кроме того, при этом падает аэродинамическое торможение, что также способствует существенному возрастанию аэродинамического качества.

Зону действия экранного эффекта определяют по нормированной высоте полета  $\eta = h/b$  приближенным неравенством (рис. 1)

$$\eta < 0,4, \quad (1)$$

где  $b$  – хорда крыла. Ясно, что при опорной поверхности с существенными неровностями экранный эффект возможен только при больших размерах аппарата. Это утверждение является бесспорным [1–5].

Авторы долгое время борются за английский перевод слова «экраноплан» как «ekranoplane», но пока в части публикаций можно еще встретить «ekranoplan» – заимствование из старых закрытых советских изданий. Чисто англоязычный термин: *Wing-in-Ground effect vehicle*, или *WIG-craft*. Японский вариант: *WISES (Wing in Surface Effect Ship)*.

### История и четыре этапа развития экранопланов в мире

История первых разработчиков и исследователей экранопланов начинается с 30-х гг. XX в. и связана с именами финского инженера Е. Каарио, советских авиаконструкторов П. И. Гроховского и Р. Л. Бартини, шведа Н. Троекна, американца

Д. Уорнера. Более широко экспериментальные работы были развернуты несколько позднее У. Бертельсоном и Н. Дискинсоном, Х. Вейландом. Не будем упоминать многие построенные в разных странах, в основном в США, одноместные катера-экранопланы [2].

Принципиально отличается от описанного первого этапа развития экранопланов второй этап, связанный с именем выдающегося русского конструктора Р. Е. Алексеева (1916–1980). Под его руководством, в последние годы – исключительно идейным из-за конфликта с министром судостроения, в период с 1961 по 1990 г. были построены и испытаны более десяти экспериментальных больших экранопланов по заказу советского военно-морского флота. Именно тогда в «ЦКБ по СПК» были созданы крупнейший до настоящего времени экраноплан КМ со взлетной массой 540 т, первый в мире серийный большой десантный экраноплан «Орленок» со взлетной массой 140 т (построены четыре копии) и ударный ракетный экраноплан «Лунь» (рис. 2) со взлетной массой 380 т (прототип недостроенного экраноплана «Спасатель»). Его размеры: длина – 73 м, размах крыла – 44 м, высота корпуса – 19 м, масса «сухого» аппарата – 243 т. Приходится констатировать, что с распадом СССР в 1991 г. второй этап развития экранопланов завершился вместе с потерей бюджетного финансирования.

Третий этап развития экранопланов в мире характеризуется попытками наладить серийное производство малых дешевых экранопланов при скудном корпоративном финансировании и найти для них платежеспособного покупателя. В некотором смысле он повторяет первый этап, но при значительно большем числе участников и при широком географическом распределении центров разработки и производства. Предполагалось массовое использование малых экранопланов для



• *Рис. 2. Ракетный экраноплан «Лунь» разработки «ЦКБ по СПК»*  
 • *Fig. 2. Rockets carrier ekranoplan «Lun» developed by the Central Design Bureau for Hydrofoils*

обслуживания транспортных потоков в островных районах Юго-Восточной Азии и других прибрежных территорий с малым числом аэродромов, однако уже вложенные долговременные инвестиции в авиационные перевозки не стимулировали новые вложения в экранопланостроение, особенно с учетом низкой мореходности малых экранопланов. В результате существенного коммерческого успеха экранопланы не показали.

Наконец, сейчас наступил четвертый этап развития, характеризуемый возрождением интереса к большим экранопланам с неограниченной мореходностью и способностью решать широкий круг специальных задач, в том числе в интересах МО, МЧС и Роскосмоса. В этих условиях можно надеяться на определенное бюджетное финансирование новых разработок, однако только при очень четком бизнес-плане, тщательном выборе исполнителя и безупречной финансовой отчетности. Годом начала четвертого этапа можно считать 2018-й, когда профильный на тот момент вице-премьер Российской Федерации Ю. Борисов и министр промышленности и торговли Д. Мантуров анонсировали разработку и постройку экспериментального экраноплана «Орлан» со взлетной массой 600–800 т и начало испытаний в 2027 г. [6–12]. Правда, через год сочетание «Орлан» 600–800 т перестали употреблять и заменили его на «Чайка» А-50 со взлетным весом всего 50 т [12]. Скорее всего, это явилось следствием сокращения бюджета, но рассматривать здесь параметры «Чайки» бессмысленно, потому что указанный вес не может быть у экраноплана с неограниченной мореходностью – «Чайку» нельзя отнести к большим экранопланам. Поэтому мы будем рассматривать условный «Орлан» массой 800 т, а не вариант облегченной «Чайки». Логика в этом есть, поскольку два американских проекта также пока рассматриваются не «в железе», а лишь как условные проекты. Многофункциональность и всепогодность «Чайки» (и в итоге «Орлана») – вот что нас интересует в первую очередь. В зависимости от обстоятельств разработчики могут вернуться к первоначально заявленным размерам «Орлана».

Начавшаяся на Украине в феврале 2022 г. специальная военная операция России может скорректировать и сроки постройки экраноплана, и его миссии, в том числе ориентированные на новые интересы Минобороны России в Черном и Средиземном морях, в Арктике. Скорее всего, при реализации конфигурация «Орлана» будет повторять «Лунь» (см. рис. 2) либо будет создан тандемный вариант, имеющий преимущества при большой массе аппарата.

При переходе к четвертому этапу развития экранопланов существенно изменился состав стран и научно-производственных центров, игра-

ющих в этом процессе решающую роль и способных обеспечить инвестиции в несколько миллиардов долларов США, необходимые для создания нового поколения экранопланов. Важную роль при принятии решения имеют также соображения престижности постройки первого в мире экраноплана с неограниченной мореходностью, что и способствовало уже давно сформировавшейся конкуренции России и США в области экранопланостроения, оттеснив другие страны в позиции догоняющих (если рассматривать трех игроков, то пока третьим является КНР, но в этой статье мы ограничимся двумя конкурентами).

Первая попытка США построить американский вариант «Луня» была предпринята в 1993 г., причем рассматривался вопрос о российско-американском сотрудничестве, а не о конкуренции. Лишенная нормального бюджетного финансирования ведущая российская фирма «ЦКБ по СПК» была готова задешево продать американской стороне информацию о конструкции «Орленка» и «Луня» с демонстрацией нескольких режимов полета для «Орленка». Несмотря на то, что до 1992 г. все работы по указанной тематике в России имели гриф секретности, при поддержке РАН была создана компания «Российско-американская наука», которая подписала с американской стороной соответствующий контракт и организовала визит правительственной группы США и специалистов фирмы *Aerocon* для общения и обмена информацией с российскими разработчиками экранопланов. Встречи состоялись в 1993 г. в Москве, Нижнем Новгороде и Каспийске. В экспертную группу конгресса США (более 20 специалистов) под руководством вице-адмирала М. С. Фрэнсиса вошли в частности президент компании *Aerocon*, финансировавшаяся Министерством обороны США, Стефан Хукер – энтузиаст экранопланостроения, знаменитый авиаконструктор Берт Рутан и известный гидродинамик Д. Савицкий. Фирмы *Aerocon* и *McDonnell Douglas Aerospace* подписали протокол о совместной работе с «ЦКБ по СПК». Предполагалась совместная разработка и производство экранопланов коммерческого назначения. Этот проект был включен правительством Российской Федерации в число перспективных программ российско-американского сотрудничества в области наукоемких технологий. Стоимость программы продолжительностью до 2010 г. с американской стороны составляла 18 млрд долл. Однако реально за организацию визита специалистов и демонстрационные полеты американская делегация заплатила России менее 300 тыс. долл., что в несколько раз меньше произведенных расходов на прием делегации. По итогам работы делегации предполагалось,

что Конгресс США примет решение о развитии программы экранопланостроения в США, однако этого не произошло по неизвестным авторам причинам. На этом российско-американское сотрудничество закончилось и наступил период конфронтации. В российском научно-техническом сообществе описанный эпизод «сотрудничества» трактуется как один из примеров наиболее бездарных сделок в эпоху российской «перестройки».

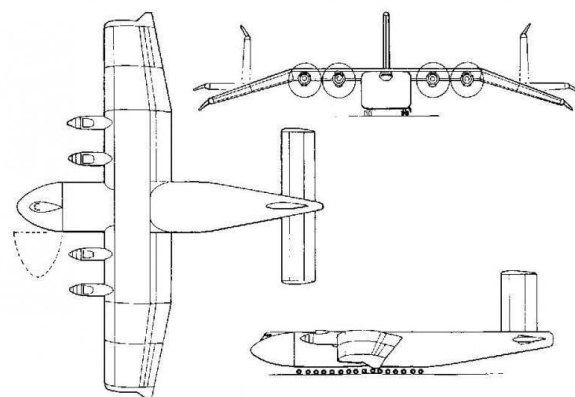
### Общие сведения об экраноплане Pelican ULTRA

Экранный эффект наиболее выражен при высоте полета  $h$ , не превышающей  $\frac{1}{5}$  хорды крыла  $b$ , и практически исчезает при  $h=b$ . По фотоизображениям известных больших экранопланов можно оценить ширину хорды крыла примерно как  $\frac{1}{5}$  длины  $L$  аппарата.

На границе тысячелетий компания *Boeing* исследовала возможность создания гигантского грузового самолета *Pelican ULTRA (Ultra Large Transport Aircraft)*, который мог бы летать и как обычный самолет, и как экраноплан. Концепция *Pelican ULTRA* предполагала построение экраноплана с рекордным размахом крыла в 152 м, длиной корпуса 122 м и грузовым отсеком общей площадью 2700 м<sup>2</sup> на двух палубах. При хорде крыла 30 м крыло должно было иметь площадь порядка 4000 м<sup>2</sup>, что обеспечивало нормальное для экранопланов давление на крыло при высоте полета  $0,4 \cdot 30 = 12$  м.

Хорошо налаженная логистика – один из главных вопросов в современной войне. В случае удачной реализации проекта американская армия получила бы мощное транспортное средство для межконтинентальной переброски сил быстрого реагирования. В ходе конфликтов последнего времени вооруженные силы США тратили на передислокацию одной дивизии несколько недель. По этой причине супертяжелый по полезной нагрузке экраноплан, который предназначен для военно-транспортных и коммерческих целей, а в перспективе может стать многофункциональной высококомобильной платформой наступательного оружия – управляемых боевых средств различных классов и назначения глобального действия, привлекает повышенное внимание в американских промышленных и правительственных кругах.

В ходе первых исследований сотрудники *Boeing Phantom Works* рассматривали и другие классы транспортных средств для этой цели, однако экраноплан был признан наиболее эффективным (рис. 3) [13]. Полет на сравнительно



- Рис. 3. Концепция построения экраноплана *Pelican ULTRA* [13]
- Fig. 3. The concept of ekranoplane *Pelican ULTRA* building [13]

малой высоте способен обеспечить хорошие показатели скорости и дальности, а главное – грузоподъемности. *Pelican ULTRA* способен нести 17 танков *M1 Abrams* и десятки грузовых контейнеров. Транспортные суда, имея достаточную грузоподъемность, не могут сократить время переброски войск, а самолеты при достаточной скорости проигрывают в грузоподъемности. Рассматривался также проект грузового дирижабля, но и он не устроил разработчиков, поскольку подобная техника не дает значительных преимуществ по скорости или грузоподъемности, но при этом нуждается в специальной инфраструктуре.

На первом этапе работ над экранопланом нового поколения сотрудники компании *Boeing* создали три эскизных проекта, отличавшихся друг от друга габаритами и весовыми параметрами. Важной особенностью проекта стало стремление минимально использовать новые технологии для удешевления проекта, а также пригодность к коммерческой эксплуатации. Из трех вариантов экраноплана со взлетным весом в 1600, 2700 и 4500 т был выбран второй (грузоподъемностью 1280 т, т. е. коэффициент полезной нагрузки  $1280/2700=0,47$ ). Именно при таких габаритах перспективное транспортное средство по рас-



четам исполнителей могло показать наилучшее соотношение грузоподъемности, летных характеристик и экономичности.

Столь крупные размеры экраноплана потребовали применить двухпалубную компоновку фюзеляжа с отдельной кабиной экипажа. Ее предложили разместить в передней части фюзеляжа. Почти весь объем фюзеляжа высотой 6 м предполагалось отдать под негерметизированный грузовой отсек и разделить на два объема. Согласно расчетам, на нижней палубе размещались до 100 (в два яруса) стандартных 20-футовых контейнера. Еще 50 таких же контейнеров могла бы принять верхняя палуба. Кроме того, в центроплане толстого крыла предусмотрели место для 40 контейнеров. Для погрузки и выгрузки экраноплан должен был иметь отклоняемый носовой обтекатель и люк в хвосте. Таким образом, в коммерческом варианте экраноплан *Pelican ULTRA* мог бы составить конкуренцию другим видам транспорта, потеснив их за счет своей скорости, дальности и экономичности. В военном варианте перспективный экраноплан мог одновременно взять на борт, как уже было отмечено, до 17 танков *M1 Abrams*. Для сравнения, самый крупный из американских военно-транспортных самолетов *Lockheed C-5 Galaxy* может перевозить лишь два таких танка. Согласно выполненным расчетам [6–10], летательные аппараты *Pelican ULTRA* при необходимости могли обеспечить переброску сухопутной дивизии из США, например, в Ирак за пять–шесть дней, т. е. в несколько раз быстрее, чем подобные операции осуществлялись при помощи военно-транспортной авиации и флота.

Главным назначением *Pelican ULTRA* должна была стать межконтинентальная переброска военных подразделений американской армии со всем вооружением. При разработке концепции исследовались разные решения. От морских экранопланов по типу созданных в СССР (России) в *Boeing* отказались из-за их особенностей – «неоптимальная (для самолета) форма крыла, проблемы с устойчивостью, проблемы с мореходностью и стартом с воды. Сухопутный аппарат мог бы действовать с существующих аэродромов, иметь более «чистые» аэродинамические формы, меньшую потребную мощность двигателей, большие возможности вне действия экрана» [15–17].

**Критические замечания авторов по проекту *Pelican ULTRA*.** Стремление построить полномасштабный самолет, демонстрирующий на малых высотах свойства экраноплана, естественно, но противоречит российскому уникальному опыту обеспечения устойчивости движения в экранном режиме при помощи высоко поднятого хвостового горизонтального стабилизатора.

На рис. 3 такого стабилизатора действительно нет. Это заставляет рассматривать идею тяжелого самолета со свойствами экраноплана очень критически, даже в случае подключения мощных средств автоматического демпфирования и управления. Авторам представляется, что надо исходить из требования «оптимального экраноплана», способного также приемлемо летать как самолет. Иначе не добиться хорошей топливной экономичности в экранном режиме и увеличения дальности полета с одной заправкой.

Транспортный экраноплан со взлетным весом около 2700 т и полезной нагрузкой на уровне 1280 т должен был иметь подходящую силовую установку. После анализа нескольких вариантов специалисты остановились на четырех двигательных установках, размещенных на крыле. Специально для нового экраноплана предлагалось создать газотурбинный двигатель на базе конструкций, применяющихся в судостроении. Расчетная мощность каждой из двигательных установок, включающих в себя по два газотурбинных двигателя, должна была достигать 60–80 тыс. л. с. (эта оценка спорная, возможно, заниженная). В качестве движителя выбрали соосные многолопастные винты диаметром около 15 м [14].

Ввиду очень большого взлетного веса перспективный транспортный экраноплан предполагалось оснастить соответствующим шасси. Под фюзеляжем должны были размещаться 38 стоек со спаренными колесами. Подобная система могла значительно усложнить маневрирование по аэродрому и затрудняла взлет, однако обеспечивала приемлемую нагрузку на взлетную полосу. Для обеспечения возможности использования современных аэродромов предлагалось оснастить концевые части крыла подъемными механизмами.

Сверхмощная силовая установка, развитая механизация крыла и система управления могли обеспечить приемлемые взлетно-посадочные характеристики. Так, утверждалось, что *Pelican ULTRA* сможет взлетать с разбегом всего 2200 м [5, 13]. В качестве основного режима полета рассматривалось движение со скоростью около 460 км/ч на высоте не более 10–20 м над поверхностью. При необходимости транспортная машина могла бы разогнаться до скорости 720–725 км/ч (это слишком много для обычного экраноплана) и, подобно полноценному самолету, подниматься на высоту около 6000 м. Однако при подъеме на высоту значительно сокращалась расчетная дальность полета. При полете с использованием экранного эффекта аппарат мог бы доставлять грузы на дальность около 10 тыс. миль, но при полете на самолетной высоте этот параметр не мог превышать 6,5 тыс. миль [13]. Экономия топлива

за счет экранного эффекта однозначно определяется из увеличенной дальности как  $(10,0 - 6,5) / 6,5 = 0,54 = 54 \%$ . Чтобы обеспечить такое существенное проявление экранного эффекта, как следует из графика на рис. 1, нормированная высота полета  $n = h/b$  должна составлять  $n = 0,1$ , откуда при  $b = 30$  м получим  $h = 3$  м. Такая малая высота не может гарантировать уверенный полет в штормовом море и приемлема только при слабом волнении. Отсюда можно сделать вывод о чересчур оптимистичной оценке эффективности использования экранного эффекта. При пессимистичной оценке  $n = 0,4$  для высоты полета в экранном режиме получим  $h = 0,4b = 12$  м. Соответственно, максимальная дальность полета при этом составит не 10 000 м, а примерно лишь  $6000 \cdot 1,1 = 6600$  км. Возможно, это обстоятельство и привело к остановке проекта.

Компания *Boeing* начала готовить детальный технический проект экраноплана *Pelican ULTRA* в 2002 г. [13]. К десятилетию проекта планировалось провести ряд важных предварительных испытаний, а к 2015 г. построить опытный образец транспортной машины. На испытания и доводку в первоначальном графике отводилось пять-шесть лет. Таким образом, первые серийные экранопланы должны были поступить в эксплуатацию в начале двадцатых годов. Однако в том же 2002 г., после нескольких многообещающих пресс-релизов и хвалебных статей в прессе, поступление сведений о смелом американском проекте прекратилось. Точные данные о завершении проекта *Pelican ULTRA* не опубликованы. Вероятно, некие особенности этого транспортного средства не позволили фирме завершить проект и начать строительство прототипа в рамках утвержденного бюджета. Заметим, что уже давно появилась версия, согласно которой проект *Boeing Phantom Works* оказался настолько многообещающим, что дальнейшие работы над ним продолжились в режиме секретности. По причине отсутствия точной информации нельзя говорить, как и почему проект *Pelican ULTRA* был закрыт. Наиболее вероятным выглядит вариант событий, при котором проектирование перспективной транспортной машины столкнулось с серьезными техническими проблемами. В результате интереснейший проект самого крупного и тяжелого в мире летательного аппарата так и остался на стадии предварительного проектирования. Возможно, американские разработчики решили подождать результатов построения российского экраноплана «Орлан», чтобы уточнить постановку задачи создания *Pelican ULTRA*. Так или иначе, с 2003 г. никаких открытых публикаций по этой теме нет.

## Общие сведения об экраноплане Liberty Lifter

Как и следовало ожидать, столь грандиозный проект, как *Pelican ULTRA*, не мог испариться бесследно в коридорах Пентагона. 27 мая 2022 г. в еженедельной газете *Free European Defense Newsletter* появилось сообщение о том, что управление перспективных исследовательских проектов Пентагона *DARPA* начинает предварительную дискуссию и поиск возможных участников разработки концепции нового большого экраноплана под названием *Liberty Lifter*, которая призвана изменить (обосновать) отношение Пентагона к воздушным и морским перевозкам с помощью хорошо известного, но сложного в применении экранного эффекта [16–18].

Согласно объявлению Пентагона о контракте от 25 ноября 2022 г., эти работы оцениваются всего в 8 млн долл. *DARPA* быстро заключила контракт с фирмой *General Atomics ASI*, которая очевидно и будет в ближайшее время заниматься корректировками концепции построения большого американского экраноплана с учетом данных и по *Pelican ULTRA*, и по «Орлану». *General Atomics* имеет успешные разработки по управлению авиационными беспилотниками, что может быть логичным для первых полетов экспериментального экраноплана [19–21]. В заявлении не уточняется тип работ, включенных в контракт, но говорится, что он будет финансироваться из «фондов исследований и разработок 2022 финансового года».

О размерах и весе экраноплана *Liberty Lifter* не сообщалось ничего, но опубликованное изображение и анимация очень информативны (рис. 4).

Основное отличие *Liberty Lifter* от *Pelican ULTRA* и «Орлана» – двухкорпусный катамаран. При использовании катамаранной схемы сни-



- Рис. 4. Концепция экраноплана *Liberty Lifter* [16]
- Fig. 4. The concept of the *Liberty Lifter* ekranoplan [16]

жается маневренность (возрастает радиус поворота), но есть и преимущества по сравнению со схемой «центроплан», например, лучшая отработанность конструкции на предыдущих этапах развития экранопланов. Заметим, что в схеме «катамаран» необходимо иметь разделенную хвостовую часть для устранения препятствий при стыковке экраноплана с воздушно-космическим самолетом для завершения его посадки, однако *Liberty Lifter* пока не планируют этого.

Официальный представитель *DARPA* Александр Валан, курирующий программу *Liberty Lifter*, в своем интервью повторил уже давно известные аргументы [20]:

«Концепция, известная как эффект *Wing-in-Ground*, имеет решающее значение для обоснования конструкции разрабатываемого для Пентагона транспортного аппарата. Это явление *DARPA* надеется распространить на большие расстояния и высоты. Для полетов на очень большие расстояния несколько процентных пунктов увеличения подъемной силы и уменьшения лобового сопротивления действительно начинают проявляться с точки зрения эффективности использования.

Однако при реализации концепции экраноплана возникает множество проблем. Например, сильные волны могут привести к турбулентности воздушных потоков и локальным колебаниям корпуса и крыла аппарата, что подавит любую топливную эффективность, полученную за счет экранного эффекта. Хотя концепция экраноплана известна уже давно, оказалось, что ее трудно освоить. СССР предпринимал несколько попыток создания такого корабля, но в значительной степени не смог разработать машину, готовую к серийному производству. Одной из ошибок был тот факт, что СССР разработал аппарат, способный летать только с использованием экранного эффекта. *DARPA* не допустит такой же ошибки и предполагает, что *Liberty Lifter* сможет летать и на традиционных самолетных высотах, когда это необходимо».

И наконец наиболее существенная информация от А. Валана. Он сказал, что *Liberty Lifter* будет похож по размерам на *C-17 Globemaster*, будет весить в «сухом» варианте от 500 до 600 тысяч фунтов (227–260 т) и должен стоить примерно 340 млн долл. за каждый экземпляр. Его максимальный взлетный вес составит примерно 440 т. Размеры самолета *C-17 Globemaster*: длина 53,0 м, размах крыла 51,7 м, высота 16,8 м, т. е. линейные размеры (но не высота) экраноплана *Liberty Lifter* – в два раза меньше линейных размеров *Pelican ULTRA*.

**Критические замечания авторов по проекту *Liberty Lifter*.** Авторы пока не понимают, как можно «распространить действие экранного

эффекта на большие высоты». Кроме того, экраноплан «Лунь» и недостроенный экраноплан «Спасатель» могли подниматься на вполне самолетную высоту 3000 м для поиска на больших площадях и облета высоких препятствий. Вызывает вопросы и оценка массы *Liberty Lifter*, которая представляется заниженной. При линейных размерах (длина и размах крыла) в половину от *Pelican ULTRA* и практически совпадающих высотах коэффициент пересчета масс должен быть примерно  $1/4$ . Тогда при оценке массы *Liberty Lifter* получим  $2700 / 4 = 675$  т. По другим данным [16–18], его масса должна быть 400 т, т. е. почти как у «Луны». Конечно, расхождение в оценках массы может быть связано с различием в аэродинамической конфигурации, но создается впечатление, что *DARPA* стремится предельно снизить массу и стоимость экраноплана. При этом встает проблема ограниченной мореходности, которая будет обсуждаться далее.

Представители фирмы *General Atomics ASI* никаких интервью по проблемным вопросам не давали. США нуждаются в перспективном гидросамолете, который может нести полезную нагрузку до 45 т на расстояния до 7,5 тыс. км. В рамках заключенного контракта специалисты разработают тяжелый гидросамолет большой дальности, который сможет эффективно работать на сверхмалых высотах. Кроме того, *Liberty Lifter* будет иметь расширенные морские функции (включая взлет и посадку на воду) для работы в условиях открытого моря.

## Критерии выбора размера экраноплана

На первом и третьем этапах развития экранопланов основным критерием выбора их размеров была стоимость. Признаваемая неразвитым мировым рынком стоимость малого экраноплана в размере 1 млн долл. определяла пассажироместимость порядка пяти человек при линейных размерах аппарата до 10 м. Даже не очень крупные волны не позволяли обеспечить действие экранного эффекта, что заставляло относить такие дешевые экранопланы к озерным, но не к морским. Их коммерческая эффективность проявила себя слабо. Даже при штилевой погоде такие экранопланы часто теряли собственную устойчивость и разбивались, автоматика в управлении не применялась.

Постепенно утвердился вывод о том, что стоимостные показатели не должны учитываться при оптимизации размеров и могут выступать лишь как ограничения. Размеры экраноплана должны определяться его требуемой мореходностью, а

также, в меньшей степени, ожидаемым грузопотоком.

Специфика низковысотного полета над взволнованной морской поверхностью заключается в том, что ее неровности, создающие опасность столкновения, имеют в некотором смысле регулярный, прогнозируемый характер, определяемый состоянием моря. Высоты волн в области их малых и средних значений подчиняются закону Релея, а их аномально большие значения практически исключены. Это позволяет достаточно уверенно осуществлять полет на правильно выбранной малой высоте, не опасаясь столкновения с неожиданно встретившимся аномально высоким препятствием, как это может случиться при полете над сушей. С другой стороны, отсутствие достаточно протяженных ровных участков на взволнованной морской поверхности и движение волн усложняют точное измерение высоты полета относительно среднего невозмущенного уровня моря, что требует использования для этой цели специальных аппаратных и алгоритмических средств.

Пусть балльность волнения, характеризующая высотой волн  $H$ , задана. Рассмотрим упрощенную двумерную регулярную модель волнения. Трехмерную нерегулярную модель волнения для более точных расчетов можно взять из монографий [1, 2]. Следует учесть, что в гидрографии под высотой волн подразумевают расстояние по вертикали между гребнем волны и ее ложбиной. При этом амплитуда волны  $h$ , важная в радиотехнике и в задачах навигации, составит половину указанной высоты, т. е.  $h = H/2$ .

Требуется определить высоту полета, при которой касание (тем более – столкновение) экраноплана с гребнями волн не происходит. Для этого требуется признать, что абсолютно точное выдерживание назначенной высоты полета невозможно. И измерение высоты, и управление высотой происходит с ошибками, хотя бы потому, что любой высотомер имеет квазипостоянную составляющую ошибки, зависящую от типа подстилающей поверхности, но заранее не известную. Вполне правомерно считать, что ошибка  $\Delta$  в управлении высотой полета составляет 5 % от фактической высоты  $h$ , т. е. даже при наиболее неблагоприятной ошибке управления касания волны не будет при выполнении условия  $h > H/2 + \Delta$  или  $h = H/2 + 0,05h$ . Отсюда для условия некасания получаем требования

$$h > 0,526 H, \quad (2)$$

$$\text{или } H < 1,90 h. \quad (3)$$

При анализе полета больших экранопланов обычно рассматривают следующие варианты ре-

гулярного ветрового морского волнения по международной шкале:

– 5 баллов – бурное волнение ( $H = 2,5 - 4,0$  м),  
– 6 баллов – очень бурное волнение ( $H = 4,0 - 6,0$  м),

– 7 баллов – сильное волнение ( $H = 6,0 - 9,0$  м).

Принимая обычно используемую для российских экранопланов величину  $H = 6,0$  м, формула (1) для минимальной высоты полета дает  $h > 0,526 \cdot 6 = 3,16$  м.

При сильном 7-балльном волнении получим  $h > 0,526 \cdot 9 = 4,73$  м. Делаем вывод о крейсерской высоте полета экраноплана практически в 5 м с небольшим запасом, учитывающим все случайные факторы неопределенности в постановке задачи, в том числе редкие аномальные выбросы высоты волны.

Теперь выясним, при каких размерах экраноплана указанная высота полета не выведет экраноплан из зоны действия экранного эффекта. Как уже отмечалось во введении, высота полета должна быть не больше 0,4 от хорды крыла  $b$ , при этом аэродинамическое качество возрастает на 12 %. Если же высота полета в два раза меньше и составляет 0,2 от хорды крыла, то аэродинамическое качество возрастает значительно более существенно и достигает +25 % от самолетного режима. С другой стороны, для большинства «алексеевских» экранопланов, включая «Лунь», хорда крыла составляет примерно 1/4 от длины аппарата  $l$ .

Отсюда получим  $4h / L > 0,4$ , откуда  $L > 10h$  для предельно малых допустимых размеров аппарата и  $L > 20h$  для существенного действия экранного эффекта.

При  $h = 5$  м получим требуемую минимальную длину экраноплана в 50–100 м. Размах крыла обычно примерно равен длине аппарата.

Делаем вывод о том, что все три варианта рассматриваемых в статье экранопланов обладают практически неограниченной мореходностью, особенно если не рассчитывать на слишком активное проявление экранного эффекта. Иногда целесообразно воспользоваться прогнозом погоды или выбирать маршрут полета, облетая наиболее штормовые участки моря. В Тихом океане есть несколько районов, где особенно часто бывает сильное волнение.

## Миссии, возлагаемые на большие экранопланы

При проектировании российских и американских экранопланов приходится учитывать существенное различие в возлагаемых на них в настоящее время миссиях.

Как заявлено американскими разработчиками, основная решаемая ими задача – ускорение доставки сил быстрого реагирования в удаленные театры военных действий, военно-морские базы и в «горячие точки». Общее число зарубежных военных баз США – несколько сотен. Их содержание (персонал с семьями, обслуживание самой совершенной техники) обходится дороже, чем на территории США. Более выгодно содержать все это на своей территории, но в нужный момент перебросить в требуемую точку. *Pelican ULTRA* смог бы решить эту задачу. *Liberty Lifter* уступает последнему размерами, однако будет иметь такие же транспортные возможности, что и основной американский военно-транспортный самолет *Lockheed C-5 Galaxy*, а также расширенные морские функции для работы в условиях открытого моря.

Для российского экраноплана «Орлан» размеры определяются исключительно требуемой мореходностью, а не грузоподъемностью. Конечно, грузо- и пассажиропотоки на обслуживаемых экранопланом линиях (особенно в Арктике) желательны интенсивные и постоянные (без сезонных ограничений), но основные задачи следующие:

- патрулирование приграничных территорий;
- ассистирование при горизонтальном запуске и посадке воздушно-космическому самолету;
- поиск и эвакуация посадочной капсулы приземляющихся космических кораблей;
- аварийно-спасательные работы;
- ударные (ракетные) операции;
- десантные операции.

Большинство перечисленных задач предполагают возможность взлета и посадки «Орлана» в произвольной точке океана, а не на взлетно-посадочной полосе. Это позволяет отбросить колесное шасси как элемент конструкции, но зато требует излишней мощности двигателей для преодоления «горба» гидродинамического сопротивления при взлете с воды.

## Необходимость автоматического управления полетом экраноплана

Устойчивость движения любого летательного аппарата является его абсолютно необходимым свойством. В современной технике она все меньше зависит от наличия собственной устойчивости и все более обеспечивается за счет средств автоматического управления. Аэродинамическая модель экраноплана чаще всего выбирается или даже оптимизируется по критериям мореходности и топливной экономичности, после чего синтезируется многомерный контур автоматического управления с требуемым запасом устой-

чивости во всех разрешенных режимах движения. Система автоматического управления (САУ) должна разгружать пилота, а также блокировать его ошибочные команды, способные вывести объект управления в недопустимые области пространства состояний, создающие опасность катастрофы. Наконец, САУ должна освобождать пилота от выполнения типовых маневров, оптимальным образом реализуя переход от текущей точки в пространстве состояний в требуемую конечную точку. Примером типового маневра является координированный поворот на требуемый угол, выполняемый при одновременном изменении сил и моментов сил, генерируемых рулем направления, закрылками, рулем высоты и тягой двигателей. Пилот дает лишь команду поворота, все остальные действия осуществляет автоматика. Выполнение маневра «горка», взлет и посадка, оптимизация траектории движения с частичным огибанием длинных морских волн – в идеале тоже прерогатива САУ.

Часть указанных функций САУ была реализована еще на экраноплане «Лунь» в САУ «Смена-3» (главный конструктор – д-р техн. наук В. Б. Диомидов) [3]. Затраты на создание этой САУ составили примерно  $\frac{1}{10}$  часть от всех затрат на экраноплан. Реально ее разработка состояла из двух этапов, первый из которых – «Смена-4» для «Орленка», и вторая – «Смена-3», в которой были использованы все наработки «Смены-4». Предполагался и третий этап работы по переходу к цифровой САУ, но финансирование было прекращено в 1991 г. С того времени никаких попыток создания экраноплана с САУ не предпринято.

В рассматриваемых нами трех проектах построения больших экранопланов избежать использования совершенных САУ невозможно, но для каждого экраноплана они могут быть специфическими.

*Pelican ULTRA* – наиболее дорогой экраноплан, и стоимость его САУ может быть очень высокой, если исходить из  $\frac{1}{10}$  доли от полной стоимости аппарата. *Boeing*, безусловно, имеет высокий потенциал для создания САУ летательных аппаратов и научный потенциал в области автоматизации управления полетом. По-видимому, будут предприняты усилия по исследованию возможности создания САУ экраноплана с использованием самолетного задела, это позволит ускорить разработку, но все же алгоритмы управления в итоге должны быть специфическими и учитывать все очень существенные особенности экраноплана как сугубо нелинейного и нестационарного объекта. Основными задачами САУ для этого экраноплана должны быть демпфирование и вообще обеспечение устойчивости в любом

режиме полета, поскольку собственной устойчивости у него нет – отсутствует высоко поднятый над крылом горизонтальный стабилизатор. Поскольку у *Pelican ULTRA* основная концепция использования – транспортировка военных контингентов и тяжелой техники на большие расстояния, причем при использовании аэродромов, т. е. без необходимости взлета с воды, объем работ по созданию необходимой САУ может оказаться относительно небольшим. Это позволит и тщательно отработать алгоритмы управления, и создать необходимую аппаратную часть. Автоматизация управления в режимах взлета и посадки повышает уровень безаварийности и снижает срок подготовки пилотов для экранопланов.

Экраноплан *Liberty Lifter* также может иметь САУ с ограниченным набором требований, в основном для режима взлета, посадки и крейсерского полета в зоне действия экранного режима. Дополнительные сложности могут возникнуть из-за катамаранной схемы этого экраноплана, придающей специфику при выполнении координированного поворота. Несмотря на тенденцию удешевления самого аппарата и всех его агрегатов, об отказе использовать САУ не может быть речи. Немного сэкономить можно за счет возложения на пилотов части задач по управлению полетом.

Экраноплан «Орлан» требует разработки наиболее сложной, практически интеллектуальной САУ из-за широкого набора миссий, возлагаемых на этот летательный аппарат [3, 11, 14, 17, 21–23]. Создание САУ для «Орлана» всегда будет рассматриваться в России как необходимый элемент наукоемкого проектирования, олицетворяющий преемственность научных поколений и стремление к лидерству в инновационном транспорте. Часть сложностей в задаче проектирования будет связана с обеспечением полетов в Арктике.

## Метод оценки стоимости экранопланов

Стоимостная оценка конструирования и постройки любого транспортного аппарата на самых ранних стадиях проектирования очень важна. Приблизительное решение можно найти с помощью формулы Дикса и Риддла [8, 10]. Эта формула при подсчете стоимости проектируемого экраноплана  $C$  учитывает только два параметра: полную массу аппарата  $M$  в тоннах и располагаемую на борту мощность двигателей  $P$  в лошадиных силах:

$$C = K_1 M + K_2 P. \quad (4)$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  – известные [16, 18] коэффициенты, первый из которых измеряется в тысячах

долларов США за тонну, а второй – в тысячах долларов США за лошадиную силу.

Естественно, проектные работы выделяются в отдельную статью стоимости транспортного аппарата только в проектах, финансируемых государством. В коммерческих проектах такие инвестиции покрываются из прибыли, однако в любом случае они влияют на цену транспортного аппарата.

Можно подсчитать по формуле (4) оценочную стоимость конкретных изделий и сравнить с известной сейчас стоимостью этих транспортных аппаратов на долларовом рынке, что позволяет проверить справедливость приближенных расчетов. Это было сделано авторами для малого экраноплана «Иволга», гидросамолета «Бе-200», гидросамолета «А-40». Естественно, реальные стоимости были определены по публикациям в открытой печати о заключенных или готовящихся валютных контрактах. Рассматривалась базовая конструкция экраноплана без учета какого-либо специального оборудования или вооружения.

С учетом такой проведенной проверки для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  были приняты значения:  $K_1 = 0,32$  тыс. долл./т,  $K_2 = 1,3$  тыс. долл./л.с.

Подстановка данных для малого экраноплана «Иволга-12» дает: взлетная масса 3,9 т, полезная нагрузка 1,2 т, сухая масса  $M = 3,9 - 1,2 = 2,7$  т, тяга двух двигателей  $P = 0,82 \cdot 10^3$  л.с.  $C = 0,32 \times 2,7 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 0,82 \cdot 10^3 = (0,84 + 1,06) \cdot 10^6 = 1,90 \cdot 10^6 = 1,9$  млн долл. США. Рыночная стоимость экраноплана «Иволга-12» 1–2 млн долл., т. е. оценка, сделанная по формуле (4), имеет приемлемую точность.

Перейдем к оценке стоимостных показателей, рассматриваемых в статье больших экранопланов.

Наибольший интерес имеет оценка стоимости проекта *Pelican ULTRA*, который рассматривался как рекордный по весогабаритным и функциональным показателям. Используем следующие его показатели:

Сухая масса (разность взлетной массы и массы полезной нагрузки)  $M = (2700 - 1280) \cdot 10^3 = 1420 \cdot 10^3$  т. Тяга двигателей  $P = 180 \cdot 10^3$  л.с. Подстановка значений  $M$  и  $P$  в (4) дает оценку стоимости  $C = 0,32 \cdot 10^3 \cdot 180 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 180 \times 10^3 = (468 + 227) \cdot 10^6 = 695$  млн долл. США или 520 млрд руб.

Для разрабатываемого сейчас экраноплана *Liberty Lifter* при использовании данных  $M = 260 \cdot 10^3$  т,  $P = 70 \cdot 10^3$  л.с. получим  $C = 0,32 \times 10^3 \cdot 260 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 10^3 \cdot 70 \cdot 10^3 = (83,2 + 91) \cdot 10^6 = 174$  млн долл. США.

Получается, что *Liberty Lifter* дешевле *Pelican ULTRA* в 4 раза или в абсолютном выражении – на 521 млн долл. Такая серьезная экономия вполне могла быть основной причиной отказа от проекта *Pelican ULTRA*.

Для перспективного российского проекта «Орлан» берем исходные данные. Сухую массу принимаем в 600 т (при этом взлетная масса может быть порядка  $M = 850\text{--}900$  т). Общая тяга двигателей должна быть не менее  $P = 90 \cdot 10^3$  л.с. Подстановка  $M$  и  $P$  в (4) дает  $C = (192 + 117) \cdot 10^6 = 309$  млн долл. США, или 230 млрд руб. Для сравнения, стоимость разработки российского самолета МС-21 со взлетной массой 73 т составила 437,4 млрд руб., включая разработку композитного крыла и новых двигателей.

«Орлан» получается дороже *Liberty Lifter* в основном из-за больших размеров и массы, что гарантирует мореходность. Некоторое уменьшение его размеров допустимо и приведет к экономии затрат. Существенно также, что «Орлан», несомненно, будет оснащен совершенной и дорогой системой автоматического управления по аналогии с «Лунем», а наличие таких интеллектуальных средств управления на *Liberty Lifter* пока неоднозначно.

Как на этом фоне выглядит реально испытанный «Лунь»? Его сухая масса – 243 т, тяга восьми двигателей НК-87 –  $P = 80 \cdot 10^3$  л.с. В результате по формуле (4) получим:  $C = 0,32 \cdot 10^3 \cdot 243 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 80 \cdot 10^3 = (77 + 104) \cdot 10^6 = 181$  млн долл. США.

Заметим, что оцененная стоимость головного образца тяжелого экраноплана «Орлан» с современной системой управления оценена в пять раз дороже стоимости мощного атомного ледокола «Сибирь» для Арктики, уже поставленного Балтийским заводом за 50 млрд руб. Всего таких ледоколов заказано пять с вводом их в эксплуатацию до 2026 г. На эти деньги можно было бы построить экспериментальный «Орлан» и испытать его при решении многих задач (космические проекты, арктические перевозки и др.).

Конечно, в любом проекте возможны форс-мажорные обстоятельства, объективно преодолимые только с увеличением финансирования. С наибольшим числом неопределенных факторов, создающих значительные риски проектирования [1–3], связан комплекс автоматического управления движением. Значительные сложности приходится преодолевать при создании мощного двигателя PD-35, необходимого для больших экранопланов и других перспективных российских летательных аппаратов. Но для создания таких двигателей «Ростеху» (производство

в Перми) уже выделено 180 млрд руб. [6, 16], т. е. половина от оцененной здесь стоимости разработки «Орлана».

## Заключение

Рассмотрение и сравнительный анализ функциональных возможностей сразу трех экранопланов способствуют получению объективной оценки инновационной привлекательности этого класса летательных аппаратов и способствует совершенствованию их развития. Российско-американское соперничество, безусловно, будет подталкивать каждую из сторон к созданию экспериментальных образцов экранопланов, после чего сложные вопросы конструирования будут ускоренно решены в процессе экспериментов.

Всестороннему рассмотрению проблем экранопланостроения способствует и специфика американского и российского подходов к их проектированию. В Америке ищут преимущества сверхтяжелого экраноплана *Pelican ULTRA* перед тяжелыми транспортными самолетами в скорости и топливной экономичности межконтинентальных транспортных операций. Естественно, экраноплан рассматривается как разновидность самолета с минимальными изменениями для возможности использования экранного эффекта на малых высотах. В частности, не используется даже общепринятый для уже построенных экранопланов высоко поднятый хвостовой горизонтальный стабилизатор. Как обеспечивается продольная устойчивость в экранном режиме, не ясно. Авторы не уверены, что средства автоматического управления могут решить проблему устойчивости экраноплана без указанного стабилизатора. Другим фактором риска является сверхтяжелый вес *Pelican ULTRA*, в семь раз превышающий вес экспериментально проверенного «Луны». Весьма значительная стоимость в 695 млн долл. также безусловно является сдерживающим фактором, заставляющим проявлять предельную осторожность при принятии решения о создании *Pelican ULTRA*.

Значительно меньший экраноплан *Liberty Lifter* утрачивает способность конкуренции с транспортным самолетом *Lockheed C-5 Galaxy* по грузоподъемности и при своих ограниченных размерах с трудом может обеспечить всепогодность (неограниченную мореходность). Но экономия примерно в 520 млн долл. по сравнению с *Pelican ULTRA* – сильный аргумент, если рассматривать *Liberty Lifter* как экспериментальный летательный аппарат для проведения натурных испытаний.

Российский проект «Орлан» выглядит ком-промиссно и по размерам, и по стоимости, и по функциональным возможностям, причем именно как морской аппарат с возможностью взлета и посадки в любой точке океана, выполнения ряда морских миссий. Особенно востребованными могут быть транспортные операции разной протяженности в Арктике, при прокладке маршрутов по поверхности воды, суши, льда и снега,

в широтном и меридианном направлениях. Часть грузопотоков по Северному морскому пути может принять на себя экраноплан, однако логистика таких перевозок должна быть тщательно изучена. С другой стороны, возможные перспективы появления американского опыта дальних скоростных перевозок также представили бы большой интерес для мирового экранопланостроения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nebylov A. V., Wilson P.* Ekranoplane – controlled flight close to surface: monograph. UK: WIT-Press, 2002. 320 p.
2. *Небылов А. В.* Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб.: СПбГААП, 1994. 307 с.
3. *Диомидов В. Б.* Автоматическое управление движением экранопланов. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ „Электроприбор“», 1996. 204 с.
4. *Небылов А. В., Небылов В. А.* Российские экранопланы: новые перспективы международного сотрудничества // Русский инженер. 2013. № 4. С. 33–36.
5. *Yim L., Bliault A., Doo J.* WIG-craft and Ekranoplane. Springer, 2010. 468 p.
6. Мантуров сообщил о разработке в России боевого экраноплана. «Гидроавиасалон – 2018». URL: <https://www.pnp.ru/politics/manturov-soobshhil-o-razrabotke-v-rossii-boevogo-ekranoplana.html> (дата обращения: 16.12.2022).
7. Мантуров рассказал о разработке экраноплана с ракетным вооружением. 8 сент. 2018. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5b93d5179a79478c7c685864> (дата обращения: 16.12.2022).
8. СМИ США нашли в России нового «морского монстра». <https://www.gazeta.ru/army/2020/05/18/13087003.shtml> (дата обращения: 16.12.2022).
9. Опытный образец экраноплана с ракетным вооружением создадут в России до 2027 года. URL: <https://tass.ru/armiya-i-orpk/5412967> (дата обращения: 16.12.2022).
10. Разработчик рассказал о создании экранопланов нового поколения в России. РИА-новости. URL: <https://ria.ru/20200518/1571598033.html> (дата обращения: 17.12.2022).
11. ЦКБ им. Алексеева сообщило, что разрабатывает экраноплан XXI века. 22 июня 2022. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/15069035> (дата обращения: 15.12.2022).
12. Аварийно-спасательный экраноплан «Чайка» А-050. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2F9f1DNfHUQ> (дата обращения: 20.12.2022).
13. The Supermassive Boeing Pelican – LARGEST CARGO PLANE EVER! URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0Yf-5B7uai0> (дата обращения: 20.12.2022).
14. Экраноплан «Орлан». <https://infomach.ru/ekranoplan-orlan/> (дата обращения: 20.12.2022).
15. *Небылов А. В., Небылов В. А.* Техничко-экономические аспекты развития многоразовых космических аппаратов с морским горизонтальным запуском и посадкой // SDTE 2022: Устойчивое развитие территорий: теория и практика: III Междунар. науч.-практ. конф. Сибай, Россия, 2022 г. 2022.
16. *Nebylov A. V., Knyazhsky A. Y., Nebylov V. A.* Optimization of 3D trajectory of the vehicle with dynamic principle of maintaining according to the criterion of minimum average true geometric altitude // Advances in theoretical & computational physics. 2020. Vol. 3, is. 3. P. 78–85.
17. *Nebylov, A. V., Sharan S., Arifuddin F.* Smart control systems for next-generation autonomous wing-in-ground effect vehicles // IFAC proceedings volumes. 2010. Vol. 43, is. 15. P. 112–117.
18. Liberty Lifter Aims to revolutionize heavy air lift. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=euAbXCIUmQI> (дата обращения: 23.12.2022).
19. DARPA has launched the Liberty Lifter project to demonstrate a leap in operational logistics capabilities by designing, building. URL: <https://www.aero-mag.com/darpa-liberty-lifter-23052022> (дата обращения: 20.12.2022).
20. Darpa разработает экраноплан Liberty Lifter. URL: <https://gomel24.com/1/darpa-razrabotaet-ekranoplan-liberty-lifter/> (дата обращения: 23.12.2022).
21. *Nebylov A. V., Watson J.* Aerospace navigation systems. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2016. 420 p.
22. *Kornev N.* On unsteady effects in WIG craft aerodynamics // International journal of aerospace engineering. 2019. Vol. 2019. P. 14. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8351293>.
23. *Nebylov, A. V., Nebylov, V. A.* WIG-Craft marine landing control at Rough Sea // Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea, 2008. P. 1070–1075.



24. Экраноплан «Чайка» сможет базироваться на воде, берегах и аэродромах. URL: <https://ria.ru/20190709/1556332349.html> (дата обращения: 23.12.2022).

## REFERENCES

1. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplane – controlled flight close to surface: monograph. UK, WIT-Press; 2002. 320 p.
2. Nebylov A. V. Measurement of flight parameters near the sea surface. SPb.: SPbGAAP; 1994. 307 p. (In Russ.).
3. Diomidov V. B. Automatic motion control of ekranoplanes. SPb.: Central Research Institute “Electropribor”; 1996. 204 p. (In Russ.).
4. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Russian ekranoplanes: new perspectives in international cooperation. Russian engineer. 2013;(4):33–36. (In Russ.).
5. Yum L., Bliault A., Doo J. WIG-craft and Ekranoplane. Springer; 2010. 468 p.
6. Manturov announced the development of a combat ekranoplane in Russia. Hydroaviasalon – 2018. Available from: <https://www.pnp.ru/politics/manturov-soobshhil-o-razrabotke-v-rossii-boevogo-ekranoplana.html> [Accessed 16 December 2022].
7. Manturov told about the development of a ground-effect vehicle with rocketarmament. 2018. Available from: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5b93d5179a79478c7c685864> [Accessed 16 December 2022].
8. The US media found a new “sea monster” in Russia. Available from: <https://www.gazeta.ru/army/2020/05/18/13087003.shtml> [Accessed 16 December 2022].
9. A prototype ekranoplane with missile weapons will be created in Russia until 2027. Available from: <https://tass.ru/armiya-i-opk/5412967> [Accessed 16 December 2022].
10. The developer spoke about the creation of a new generation of ekranoplanes in Russia. Available from: <https://ria.ru/20200518/1571598033.html> [Accessed 17 December 2022].
11. Central Design Bureau im. Alekseeva is developing an ekranoplane of the 21<sup>st</sup> century. 22 June 2022. Available from: <https://nauka.tass.ru/nauka/15069035> [Accessed 15 December 2022].
12. Emergency rescue ekranoplane “Chaika” A-050. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=2F9f1DNfHUQ> [Accessed 20 December 2022].
13. The Supermassive Boeing Pelican – LARGEST CARGO PLANE EVER!. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=0Yf-5B7uai0> [Accessed 20 December 2022].
14. Ekranoplan “Orlan”. Available from: <https://infomach.ru/ekranoplan-orlan/> [Accessed 20 December 2022].
15. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Technical and economic aspects of the development of reusable spacecraft with sea horizontal launch and landing. SDTE 2022: Sustainable development of territories: theory and practice: III International scientific and practical conference. Sibai, Russia, 2022. 2022. (In Russ.).
16. Nebylov A. V., Knyazhsky A. Y., Nebylov V. A. Optimization of 3D trajectory of the vehicle with dynamic principle of maintaining according to the criterion of minimum average true geometric altitude. Advances in theoretical & computational physics. 2020, vol. 3, is. 3, pp. 78–85.
17. Nebylov A. V., Sharan S., Arifuddin F. Smart control systems for next-generation autonomous wing-in-ground effect vehicles. IFAC proceedings volumes. 2010, vol. 43, is. 15, pp. 112–117.
18. Liberty Lifter Aims to revolutionize heavy air lift. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=euAbXCIUmQI> [Accessed 23 December 2022].
19. DARPA has launched the Liberty Lifter project to demonstrate a leap in operational logistics capabilities by designing, building. Available from: <https://www.aero-mag.com/darpa-liberty-lifter-23052022> [Accessed 23 December 2022].
20. Darpa will develop the WIG Liberty Lifter. Available from: <https://gomel24.com/1/darpa-razrabotaet-ekranoplan-liberty-lifter/> [Accessed 23 December 2022].
21. Nebylov A. V., Watson J. Aerospace navigation systems. UK: John Wiley & Sons Ltd; 2016. 420 p.
22. Kornev N. On unsteady effects in WIG craft aerodynamics. International journal of aerospace engineering. 2019, vol. 2019, pp. 14. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8351293>.
23. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-Craft marine landing control at Rough Sea. Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea; 2008, pp. 1070–1075.
24. Ekranoplane «Seagull» will be able to be based on the water, beaches and airfields. Available from: <https://ria.ru/20190709/1556332349.html> [Accessed 23 December 2022].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Небылов Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, член президиума Международной академии навигации и управления движением, член руководства Международного технического комитета IFAC Aerospace, член Генеральной ассамблеи Европейской конференции по аэрокосмическим наукам EUCASS, член Российского национального комитета по автоматическому управлению, директор Международного института передовых аэрокосмических технологий, профессор кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – навигация и управление движением.

**Небылов Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, генеральный директор Научно-инновационного центра «Аэрокос» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – навигация и управление движением, математическое моделирование.

Поступила в редакцию 15.01.2023

Поступила после рецензирования 06.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

**Nebylov Alexander V.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Member of the Presidium of the International Academy of Navigation and Motion Control, Member of the Management Board of the International Technical Committee IFAC Aerospace, Member of the General Assembly of the European Conference on Aerospace Sciences EUCASS, Member of the Russian National Committee on Automatic Control, Director of the International Institute for Advanced Aerospace Technologies, Professor at the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – navigation and motion control.

**Nebylov Vladimir A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, Director of the Aerokos Research and Innovation Center, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – navigation and motion control, modeling and simulation.

Received 15.01.2023

Revised 06.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Использование полигона распределения для синтеза алгоритмов моделирования числовых информационных потоков

Виолетта Александровна Тюринова<sup>1</sup>

✉ viletteee@yandex.ru

Кирилл Владимирович Лапшин<sup>1</sup>

kir\_i\_k@mail.ru

Александр Павлович Шепета<sup>1</sup>

alex@shepeta.com

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

**Аннотация.** При проектировании сложных систем широко используются методы имитационного моделирования, в частности моделирования входных информационных потоков данных. Часто статистические характеристики этих данных неизвестны, но имеется ограниченное число реальных записей входных информационных потоков. В этом случае для проведения статистических экспериментов необходимо расширить количество подобных записей, а для решения этой задачи используется методология синтеза алгоритмов моделирования статистических эквивалентов исходных потоков, которые, как правило, синтезируются на основе гистограмм распределений. В данной работе синтезированы алгоритмы статистических эквивалентов, использующих полигоны распределений, построенные на основе имеющихся гистограмм, что повышает точность воспроизведения статистических характеристик входных потоков данных.

**Ключевые слова:** сложная система, алгоритм моделирования, информационный поток, статистический эквивалент, синтез, гистограмма, полигон распределения

**Для цитирования:** Тюринова В. А., Лапшин К. В., Шепета А. П. Использование полигона распределения для синтеза алгоритмов моделирования числовых информационных потоков // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 98–103. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-98-103.

Original article

## The use of the polygon distribution for the synthesis of numerical information flow modeling algorithms

Violetta A. Tyurinova<sup>1</sup>

✉ viletteee@yandex.ru

Kirill V. Lapshin<sup>1</sup>

kir\_i\_k@mail.ru

Alexander P. Shepeta<sup>1</sup>

alex@shepeta.com

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

**Abstract.** When designing complex systems widely used simulation methods, in particular, modeling input information data flows. Often the statistical characteristics of these data are unknown, but there is a limited number of real entries of input information flows. In this case, for statistical experiments it is necessary to expand the number of such records to solve this problem used methodology for synthesizing algorithms and modeling statistical equivalents of initial flows, which, as a rule, are synthesized on the basis of distribution histograms. In this paper, algorithms of statistical equivalents are synthesized and using distribution polygons. Based on available histograms, which improves the accuracy of the statistical characteristics reproduction incoming data streams.

**Keywords:** complex system, modeling algorithm, information flow, statistical equivalent, synthesis, histogram, polygon distribution

**For citation:** Tyurinova V. A., Lapshin K. V., Shepeta A. P. The use of the polygon distribution for the synthesis of numerical information flow modeling algorithms. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):98–103. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-98-103.

### Введение

При проектировании сложных систем на протяжении всего их жизненного цикла широко

используются методы имитационного моделирования, которые позволяют оценивать характеристики качества проектируемых систем как в процессе самого непосредственного процесса

проектирования, так и на этапах полунатурных испытаний [1]. Это позволяет отладить алгоритмы работы сложных систем и устранить их недостатки еще до этапа опытной эксплуатации, что, естественно, удешевляет и существенно ускоряет процесс создания новейших инновационных систем [2].

Особую важность играют алгоритмы, имитирующие работу проектируемых систем в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, в частности алгоритмы, моделирующие входные информационные потоки данных, которые используют экспериментальные записи входных сигналов аналогичных систем, а на основе этих записей и синтезируются соответствующие имитационные модели. При синтезе подобных алгоритмов наиболее распространенным подходом является подбор соответствующих математических моделей случайных процессов, использующий данные гистограмм, позволяющие оценить законы распределения моделируемых числовых последовательностей. При этом критериями соответствия моделируемых последовательностей реальным сигналам выступают критерии согласия [3].

### Оценка закона распределения вероятностей исходных данных

При использовании критериев согласия одной из основных трудностей является подбор соответствующего закона распределения имитируемых параметров входных процессов с последующим подтверждением выдвинутой гипотезы. Если гипотеза подтверждается, то соответствующий закон распределения параметров постулируется и имитатор данных синтезируется как некоторый датчик случайных (точнее псевдослучайных) последовательностей, воспроизводящий этот закон распределения.

Соответствие принятого закона распределения вероятностей параметров входного потока оценивается уровнем принятия гипотезы, обычно это уровень «практической достоверности», принимаемый равным 0,95. Это означает, что примерно 95 % генерируемых датчиком последовательностей не противоречат экспериментальным данным, а что делать с пятью оставшимися процентами? Этот вопрос обычно исследователей не интересует. Однако он весьма важен.

Приведем пример. Пусть на уровне 95 % принята гипотеза, что закон распределения вероятностей параметров входных сигналов обнаружителя соответствует некоторому распределению. При анализе характеристик обнаружителя для задан-

ного уровня ложных тревог вероятность обнаружения информационного сигнала равна 0,9. Эта вероятность и является «отчетной» вероятностью качества обнаружителя. Однако эта вероятность достигается в среднем только в 95 % случаев обнаружения, т. е. фактически является условной вероятностью, а истинная вероятность будет определяться как  $0,95 \cdot 0,9 = 0,855 < 0,86$ . Это означает, что несмотря на доверительный уровень 95 %, исследователь постулирует правильность принятой гипотезы о законе распределения параметров входного сигнала на уровне 100 %.

Не противоречит ли это экспериментальным данным? Более того, в том случае, когда реальный закон распределения параметров не является общеизвестным, например составное распределение Хьюбера, подобрать гипотетическое распределение практически невозможно. Поэтому этот широко используемый подход удобен для теоретических исследований, поскольку позволяет исследовать ситуации, для которых отсутствуют экспериментальные зависимости, но он не гарантирует «хорошую» работу системы в реальных условиях. А потому такая проектируемая система нуждается в тщательной проверке ее работоспособности в реальных полунатурных экспериментах.

Второй подход к имитации входных потоков предполагает наличие достаточного большого объема эмпирического материала – реально записанных входных сигналов. В этом случае на вход моделируемой системы просто подаются оцифрованные записи входных потоков данных. Здесь полное соответствие проверки работоспособности системы в реальных условиях, но только в тех случаях, для которых эти записи имеются. Однако тут существует другая трудность – как анализировать ситуации, для которых записи отсутствуют? Поэтому рассматриваемые два подхода дополняют друг друга и должны использоваться совместно.

### Статистические эквиваленты входных сигналов

Для преодоления указанных ранее ограничений, особенно ограничений второго случая, в работах [4, 5] предложено использовать статистические эквиваленты, которые позволяют, не определяя и не постулируя статистических свойств входных потоков, генерировать потоки числовых данных, идентичные по своим статистическим характеристикам реальным потокам. Подобные статистические алгоритмы, генерирующие статистические эквиваленты входных данных, осо-

бенно полезны при обучении нейронных сетей в тех случаях, когда исходных данных не хватает [6].

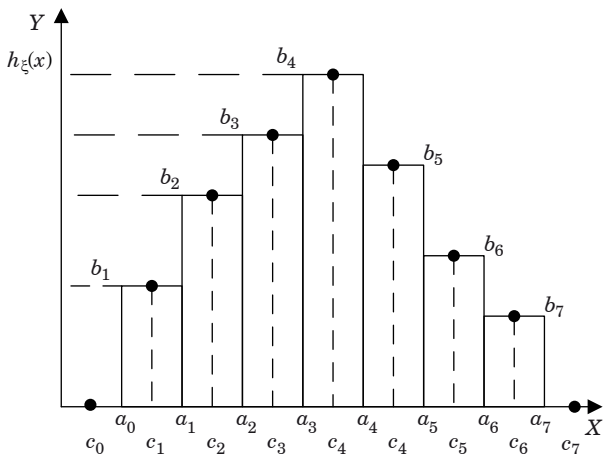
Алгоритмы, представленные в указанных ранее работах, используют в основном гистограммы распределений входных сигналов, однако известно, что полигоны распределений сходятся к истинным распределениям быстрее гистограмм. Поэтому в данной работе синтезированы алгоритмы моделирования статистических эквивалентов, которые основаны на полигонах распределений. При этом, естественно, учитывается тот факт, что подавляющее большинство эмпирических данных обобщаются в виде гистограмм, поэтому в данной работе рассмотрен один из возможных способов преобразования гистограммы в полигон таким образом, чтобы генерация числовых последовательностей, использующая этот преобразованный полигон, «не противоречила» исходным данным.

В дальнейшем будем следовать логике изложения материала и соответствующим обозначениям, принятым в работах [4, 5].

### Преобразование гистограммы распределения в полигон

Итак, пусть имеется гистограмма  $h_{\xi}(x)$  входного потока данных  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ , по которой требуется построить алгоритм моделирования числовых последовательностей, являющихся статистическими эквивалентами реальных последовательностей, имеющих представленную гистограмму  $y = h_{\xi}(x)$  (рис. 1).

Область определения гистограммы  $\mathbf{a}_x = [a_0, a_n]$  представлена объединением  $n$  подмножеств [4, 5]:



• Рис. 1. Гистограмма  $h_{\xi}(x)$  распределения  $\xi$   
 • Fig. 1. Histogram  $h_{\xi}(x)$  distributions  $\xi$

$$\mathbf{a}_x = [a_0, a_n] = [[a_0, a_1] \cup [a_1, a_2] \cup \dots \cup [a_{n-1}, a_n]],$$

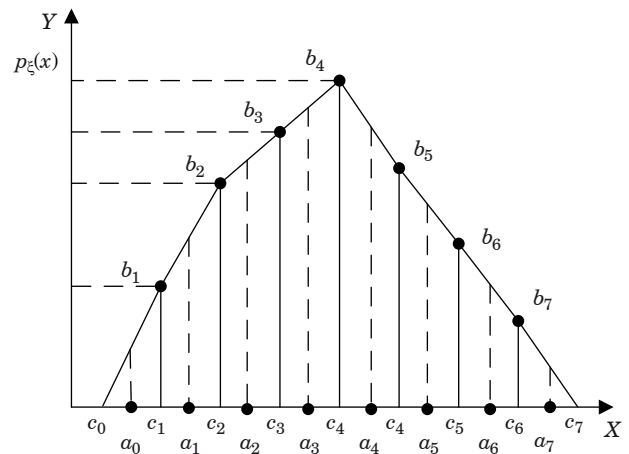
$$a_i - a_{i-1} = 2\Delta, i = 1, 2, \dots, n.$$

Элементы вектора  $\mathbf{b}_y = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$  пропорциональны эмпирическим частотам попадания случайной величины  $\xi$  в интервалы  $[a_i - a_{i-1}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1$  и  $[a_n - a_{n-1}]$  соответственно. При этом выбором масштаба оси  $Y$  обеспечиваем равенство площади гистограммы  $S_h$  единице:

$$\begin{aligned} S_h &= b_1(a_1 - a_0) + b_2(a_2 - a_1) + \dots + b_n(a_n - a_{n-1}) = \\ &= \sum_{i=1}^n b_i(a_i - a_{i-1}) = 2\Delta \sum_{i=1}^n b_i = 1. \end{aligned}$$

В этих условиях гистограмма  $h_{\xi}(x)$  является эмпирическим аналогом истинной плотности распределения  $f_{\xi}(x)$  последовательности  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ . Алгоритмы моделирования этой последовательности, построенные на основе гистограммы  $h_{\xi}(x)$  и приведенные в работе [7], генерируют последовательности, являющиеся статистическими эквивалентами  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ , которые по своим статистическим свойствам неотличимы от исходной реальной последовательности  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ .

Однако, как было указано ранее, полигон распределения  $p_{\xi}(x)$ , построенный по выборке  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ , является более точным аналогом истинной плотности распределения  $f_{\xi}(x)$  и при определенных условиях сходится к этой плотности быстрее, поэтому для построения статистических эквивалентов использование полигона является предпочтительным [5]. По этой причине, используя гистограмму  $h_{\xi}(x)$  и считая, что никаких априорных сведений, которые могли бы скорректировать построение полигона  $p_{\xi}(x)$  по



• Рис. 2. Полигон  $p_{\xi}(x)$  распределения  $\xi$   
 • Fig. 2. Polygon  $p_{\xi}(x)$  distributions  $\xi$

гистограмме  $h_{\xi}(x)$  нет, преобразуем гистограмму  $h_{\xi}(x)$  в полигон  $p_{\xi}(x)$  так, как это сделано в работе [5] (рис. 2).

Область определения полигона  $\mathbf{c}_x = [c_0, c_{n+1})$ , являющаяся объединением подмножеств  $[c_i - c_{i-1})$ , шире области определения гистограммы  $\mathbf{a}_x \subset \mathbf{c}_x$ ,  $i = 1, 2, \dots, n + 1$ , но при этом площадь под кривой полигона также равна единице, т. е. он также является эмпирическим аналогом истинной плотности распределения  $f_{\xi}(x)$  [5].

При сравнении гистограммы  $h_{\xi}(x)$  и полигона  $p_{\xi}(x)$  видно, что ядром, аппроксимирующим плотность распределения  $f_{\xi}(x)$  на множествах гистограммы  $[a_i - a_{i-1})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n - 1$  и  $[a_n - a_{n-1})$ , являются прямоугольники. При аппроксимации плотности распределения  $f_{\xi}(x)$  на множествах  $[c_i - c_{i-1}) = 2\Delta$ ,  $i = 1, 2, \dots, n + 1$ , где  $c_0 = a_0 - \Delta$ ,  $c_i = (a_i + a_{i-1}) / 2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $c_{n+1} = a_n + \Delta$ , на которых определен полигон  $p_{\xi}(x)$ , ядрами являются трапеции.

### Моделирование трапецидального ядра полигона

Алгоритм моделирования последовательностей, являющихся статистическим эквивалентом последовательности  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ , запишем

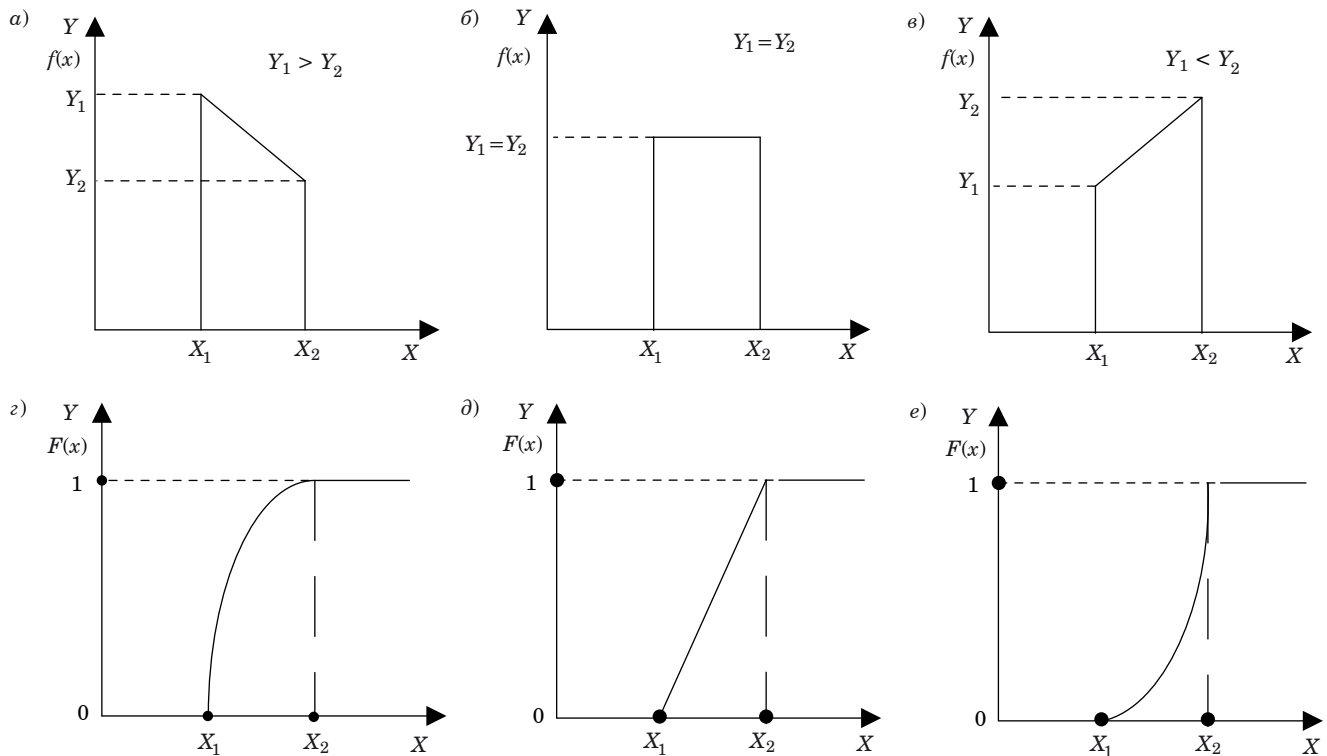
в форме двухшагового алгоритма, как это представлено в работах [5, 7]. На первом шаге выбирается одно из множеств определения полигона  $[c_i - c_{i-1}) = 2\Delta$ ,  $i = 1, 2, \dots, n + 1$ , с вероятностью численно равной площади соответствующей трапеции  $p_i$ , а на втором моделируется соответствующая случайная величина, распределенная по трапецидальному закону.

Плотность распределения вероятностей  $f_{\eta}(x)$  случайной величины  $\eta$ , распределенной по трапецидальному закону, запишем в виде:

$$f_{\eta}(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2, \\ 0, & x > x_2, \end{cases}$$

где применительно к нашему случаю индексированные значения  $y$  соответствуют значениям  $b$ , индексированные значения  $x$  соответствуют значениям  $a$  и  $x_2 - x_1 = \Delta$  для любых индексов.

На рис. 3 приведен вид функции распределения вероятностей ( $z-e$ ) для соответствующего вида плотности распределения вероятностей ( $a-e$ ).



• Рис. 3. Плотности  $f_{\eta}(x)$  и функции  $F_{\eta}(x)$  распределения случайной величины  $\eta$   
 • Fig. 3. Densities  $f_{\eta}(x)$  and functions  $F_{\eta}(x)$  random variable distributions  $\eta$

Функция распределения вероятностей  $F_{\eta}(x)$  случайной величины  $\eta$  равна

$$F_{\eta}(x) = \int_{-\infty}^x f_{\eta}(t) dt = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x^2 + \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1} x + \\ + \frac{x_1^2}{2} \cdot \frac{y_2 + y_1}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2, \\ 1, & x > x_2 \end{cases}.$$

Вычисляя обратную функцию  $F_{\eta}^{-1}(x)$ , с учетом равенства

$$0,5 \cdot (y_1 + y_2) \cdot (x_2 - x_1) = 0,5 \cdot (y_1 + y_2) \cdot \Delta = 1,$$

алгоритм моделирования случайной величины  $\eta$  [8], распределенной по трапецидальному закону, можно представить в виде

$$\eta = \begin{cases} x_1 - \frac{y_1 \cdot \Delta}{y_2 - y_1} + \sqrt{\left(\frac{y_1 \cdot \Delta}{y_2 - y_1}\right)^2 + \frac{2 \cdot \Delta}{y_2 - y_1} \cdot r}, & y_1 < y_2, \\ x_1 + \Delta \cdot r, & y_1 = y_2, \\ x_1 + \frac{y_1 \cdot \Delta}{y_1 - y_2} - \sqrt{\left(\frac{y_1 \cdot \Delta}{y_1 - y_2}\right)^2 - \frac{2 \cdot \Delta}{y_1 - y_2} \cdot r}, & y_1 > y_2 \end{cases},$$

где  $r$  случайная величина, равномерно распределенная на интервале (0, 1). В вышеприведенных выражениях для простоты записи опущена индексация, которая очевидна из представленного контекста.

### Заключение

Предложенный подход к построению алгоритмов моделирования входных сигналов сложных систем позволяет воспроизводить потоки входных данных, являющихся статистическими эквивалентами реальных входных сигналов, что приближает результаты имитационного моделирования подобных систем к результатам, получаемым при реальных испытаниях.

При построении алгоритмов моделирования переход от гистограмм к полигонам распределений приводит к более точному воспроизведению статистических характеристик входных сигналов, поскольку ядром полигона является трапеция, что дает возможность учитывать не только закон распределения входных потоков, но и его производную.

В работе предложен алгоритм моделирования числовых последовательностей, распределенных по трапецидальному закону, частным случаем которых является равномерный закон, что позволяет с помощью представленного алгоритма моделировать не только полигоны распределения, но и гистограммы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Израицев В. В., Шенета Д. А.* Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // *Науч. приборостроение*. 2000. Т. 10, № 2. С. 14–19.
2. *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.
3. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
4. *Ivanova M. S., Isakov V. I., Shepeta D. A.* Simulation models of input signals of information processing Systems Synthesized from Empirical DATA // *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems*. WECNF – 2020. 2020. С. 913–1164.
5. *Иванова М. С., Шенета А. П.* Алгоритмы моделирования информационных потоков систем обработки информации, синтезированные по эмпирическим данным // *Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах* : сб. докл. Междунар. науч. конф. 14–22 апр. 2021 г. СПб., 2021. С. 20–24.
6. *Шенета Д. А., Головин Е. Н., Иванова М. С.* Метрики качества алгоритмов машинного обучения в задачах мультиклассификации // *Научная сессия ГУАП: сб. докл., посвящ. Всемирному дню авиации и космонавтики: в 3 ч. Ч. II*. 2019. С. 278–281.
7. *Ivanova M. S.* Synthesis of algorithms for statistical equivalents of input signals of information processing systems based on empirical data // *Bulletin of the UNESCO department «Distance education in engineering» of the SUAI: collection of the papers*. Is. 5. 2020. P. 77–81.
8. *Шалыгин А. С., Палагин Ю. И.* Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1986. 320 с.

## REFERENCES

1. 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.).
2. 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.).
3. Kobzar A. I. *Applied Mathematical Statistics: for engineers and researchers*. Moscow: Fizmatlit; 2006. 816 p. (In Russ.).
4. Ivanova M. S., Isakov V. I., Shepeta D. A. Simulation models of input signals of information processing Systems Synthesized from Empirical DATA. *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems. WECONF – 2020*. 2020, pp. 913–1164.
5. Ivanova M. S., Shepeta A. P. Algorithms for modeling information flows of information processing systems synthesized from empirical data. *Processing, transmission and protection of information in computer systems '21: International scientific conference: collection of reports*. SPb.; 2021, pp. 20–24. (In Russ.).
6. Shepeta D. A., Golovin E. N. Ivanova M. S. Quality metrics of machine learning algorithms in multiclassification problems. *GUAP scientific session. Collection of reports of the scientific session dedicated to the World Aviation and Cosmonautics Day: in 3 parts. P. 2*. SPb.; 2019, pp. 278–281. (In Russ.).
7. Ivanova M. S. Synthesis of algorithms for statistical equivalents of input signals of information processing systems based on empirical data. *Bulletin of the UNESCO department "Distance education in engineering" of the SUAI: collection of the papers. Is. 5*. 2020, pp. 77–81.
8. Shalygin A. S., Palagin Yu. I. *Applied methods of statistical modeling*. Leningrad: Mechanical Engineering. Leningr. Department; 1986. 320 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тюринова Виолетта Александровна**, аспирант кафедры прикладной информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, обработка информации.

**Лапшин Кирилл Владимирович**, ведущий инженер кафедры прикладной информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы управления сложными динамическими объектами.

**Шепета Александр Павлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – обработка информации в условиях априорной неопределенности, математическое моделирование случайных процессов и систем, радиолокация, теория принятия решений.

**Tyurinova Violetta A.**, Postgraduate Student at the Department of Applied Informatics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical modeling, information processing.

**Lapshin Kirill V.**, Leading Engineer at the Department of Applied Informatics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – control systems of complex dynamic objects.

**Shepeta Alexander P.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Applied Informatics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – information processing in conditions of a priori uncertainty, mathematical modeling of random processes and systems, radar, decision theory.

Поступила в редакцию 14.01.2023

Поступила после рецензирования 06.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 14.01.2023

Revised 06.02.2023

Accepted 28.02.2023



## Газовая хроматография как метод оценки баланса полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот в маслах и жирах природного происхождения

Татьяна Ивановна Фомичева<sup>1</sup>

✉ mukhlenova@mail.ru

Елена Вениаминовна Колужникова<sup>2</sup>

elenakoluznikova@gmail.com

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Приведены сведения о хроматографическом исследовании масел и жиров различного происхождения и описание их полезных для человеческого организма свойств с точки зрения жирнокислотного состава. Масла характеризуются высоким содержанием жирных кислот различных видов, как насыщенных, так и ненасыщенных кислот  $\omega$ -3,  $\omega$ -6 и  $\omega$ -9.

Хроматографический метод анализа позволяет оценить количественные соотношения компонентов. Выбор пищевых масел и жиров, применяемых в качестве биологически активных добавок и лекарственных средств для различных целей, необходимо осуществлять на основании методических рекомендаций «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации», пользуясь результатами исследования с использованием хроматографа «Кристалл 5000.2».

**Ключевые слова:** хроматографический анализ, жирные кислоты

**Для цитирования:** Фомичева Т. И., Колужникова Е. В. Газовая хроматография как метод оценки баланса полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот в маслах и жирах природного происхождения // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 104–109. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-104-109.

Original article

## The gas chromatography as a method to evaluate polyunsaturated and saturated fatty acids balance in oils and fats of natural origin

Tatyana I. Fomicheva<sup>1</sup>

✉ mukhlenova@mail.ru

Elene V. Koluzhnikova<sup>2</sup>

elenakoluznikova@gmail.com

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

<sup>2</sup> Saint Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article provides information on the chromatographic study of oils and fats of various origins and a description of their beneficial properties for the human body in terms of fatty acid composition. The oils are characterized by a high content of fatty acids of various types, both saturated and unsaturated  $\omega$ -3,  $\omega$ -6 and  $\omega$ -9.

The chromatographic method of analysis allows us to evaluate the quantitative ratios of the components. The selection of edible oils and fats used as biologically active additives and medicines for various purposes should be carried out on the basis of the "Norms of physiological energy and nutritional needs for various groups of the population of the Russian Federation", using the results of the study on the Crystal 5000.2 chromatograph.

**Keywords:** chromatographic analysis, fatty acids

**For citation:** Fomicheva T. I., Koluzhnikova E. V. The gas chromatography as a method to evaluate polyunsaturated and saturated fatty acids balance in oils and fats of natural origin. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):104–109. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-1-104-109.

## Введение

Установление достоверной структуры жирных кислот может осуществляться при помощи хроматографических исследований [1, 2].

Для идентификации состава масел по компонентам чрезвычайно эффективно использование приборов и методов газожидкостной хроматографии. В частности, для определения состава образцов используют такие приборы, как хромато-масс-спектрограф *Agilen 5977*, где газовый хроматограф разделяет компоненты образца, а масс-спектрометр отвечает за их детектирование и идентификацию. Также для анализа успешно применяют газовый масс-спектроанализатор *Thermo-Scientists ISQ*. Анализ масляных фракций успешно осуществляют с помощью газожидкостных капиллярных анализаторов. Методики определения жирных кислот достаточно разнообразны. Одним из эффективных вариантов определения состава является следующий: образцы фосфолипидов первоначально нагревают в смеси метанол/HCl или метанол/NaOH, при этом жирные кислоты переходят в процессе переэтерификации в соответствующие метанольные эфиры. Метанольные фракции жирных кислот загружают в хроматографическую колонку, где при нагреве анализируемые компоненты, переходя в газообразную фазу, подвергаются собственно газожидкостному хроматографическому анализу.

Принцип действия хроматографов основан на разделении компонентов пробы методом газо-адсорбционной, газожидкостной хроматографии и масс-спектрометрии с последующим детектированием и обработкой хроматографических сигналов с помощью программного обеспечения [2]. По режиму работы хроматографы относятся к изделиям многократно циклического действия.

Комплексы состоят из газового хроматографа с комплектом детекторов и устройств ввода пробы, персонального компьютера (или устройства с аналогичным функциональным назначением), программного обеспечения, методик анализов [2].

Целью работы является оценка возможности применения метода газовой хроматографии для выбора наиболее оптимального продукта в качестве источника различных насыщенных и ненасыщенных кислот омега-3, омега-6 и омега-9 из широкого спектра жиров и масел, употребляемых в качестве биологически активных добавок.

## Материалы и методы исследования

Использование хроматографии для анализа жирнокислотного состава масел природного про-

исхождения позволяет определить их преимущества и недостатки для использования в качестве источника полиненасыщенных жирных кислот [3, 4].

Сравнение составов различных натуральных жиров и масел позволяет определить биоактивные свойства отдельных представителей семейства по их компонентам.

В качестве модели были выбраны образцы природных масел и жиров различного происхождения и способа получения, которые используются в качестве источника полезных для человека компонентов – незаменимых жирных кислот. Представлен широкий набор продуктов, которые мы используем в качестве эталонов для подбора более удобного источника необходимых нам ингредиентов.

Для поддержания здоровья человеческого организма требуется сбалансированное питание. Современные представления о потребностях человека в незаменимых (эссенциальных) пищевых веществах основаны на исследованиях, проведенных еще в конце XIX в. К таким веществам относятся жирные кислоты, аминокислоты, витамины, минеральные вещества.

Для восполнения в организме человека недостатка веществ, которые необходимы для правильного функционирования всех органов [5, 6], используются биологически активные добавки и лекарственные препараты.

Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) – семейство ненасыщенных жирных кислот, имеющих двойную углерод-углеродную связь. Они должны поступать с пищей, так как не синтезируются в организме человека. В качестве их источника обычно используют рыбий жир. Однако в нем содержится также большое количество насыщенных жиров. Их существенно меньше в растительных маслах, что является преимуществом при использовании последних в качестве биологически активных добавок (БАД).

Жирные кислоты в организме человека в свободном виде практически не встречаются. Они входят в состав липидов как структурный компонент различных классов: триглицеридов, фосфолипидов и др. [7–9]. Линолевая и  $\alpha$ -линоленовая кислоты могут быть синтезированы только растениями. Из них в организме животных и человека синтезируются длинноцепочечные арахидоновая, эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты.

Ненасыщенные жирные кислоты [7, 8] – линолевая омега-6, линоленовая омега-3, пальмитолеиновая омега-7, олеиновая омега-9 – улучшают состояние кожи, миристиновая кислота способствует повышению иммунитета.

Линолевая кислота действует на клеточные мембраны, способствует усвоению кальция, регулирует процесс пищеварения и обеспечивает здоровье кожи [5, 6]. Исследования показали [7], что повышенное потребление омега-3 ПНЖК достоверно (почти в десять раз) снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний у здоровых людей, способствует выздоровлению и на 35 % снижает смертность среди людей, перенесших эти заболевания.

Пальмитиновая и стеариновая кислоты участвуют в регулировании уровня холестерина, снижают риск появления атеросклероза [9]; арахидоновая кислота защищает от бактерий и неблагоприятной микрофлоры; стеариновая кислота обладает смягчающим действием; линолевая кислота питает волосы и кожу; лауриновая кислота увлажняет и заживляет ткани [5].

Известно [8, 9], что замена насыщенного жира в пище линолевой кислотой снижает общее количество холестерина. Удобство использования для поддержания сбалансированного количества незаменимых кислот при приеме в виде масла существенно облегчает задачу как при применении жидкого масла, так и при использовании в виде капсулированного продукта.

Основы фармакологического действия омега-3 ПНЖК хорошо изучены [9]. Однако уровень их потребления жителями нашей страны крайне низок. Особенно важным является выявление продуктов с высоким содержанием этих веществ.

## Результаты исследования и их обсуждение

Образцы природных масел и жиров различного происхождения и способа получения, выбранные для исследования, используются в качестве источника полезных для человека компонентов.

- Таблица 1. Массовая доля насыщенных жирных кислот
- Table 1. Saturated oil acids content

Содержание насыщенных жирных кислот, масс. %					
Кислота	жир рыбный пищевой (форель)	жир рыбный пищевой (лосось)	рапсовое масло	льняное масло	соевое масло
Миристиновая C14	1,1	5,7	0,1	0	0,1
Пальмитиновая C16	8,1	12,9	4,9	0	10,3
Пальмитолеиновая C16:1	2,4	6,6	0,2	5,7	0,1
Стеариновая C18	2,1	2,8	1,8	4,1	4,5
C20:1 Арахидоновая	0,3	0,3	0,5	0,1	0,4
C22:0 Бегеновая	0,1	0,3	0,3	0,1	0,5
Всего	14,1	28,6	7,8	10,0	15,9

Из большого количества имеющихся масел и жиров (подсолнечное, оливковое, льняное, рапсовое, сурепное, горчичное, соевое, кедровое, какао, облепиховое, семян тыквы, рыбных жиров и др.) были выбраны два рыбных жира, рапсовое, льняное и соевое масла.

Анализ образцов осуществляли на газовом хроматографе модели «Кристалл 5000.2» с капиллярной ГХ-колонкой DB-FFAP/HP-FFAP/ZB-FFAP. Масла для анализа были подготовлены согласно ГОСТ 31663-2012 «Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот». Исследования также проводили в соответствии с методикой ГОСТ 31663-2012 [2], используя для сравнения в качестве стандартных образцов смесь метиловых эфиров 37 жирных кислот.

Обработка данных проводилась на компьютере. Результаты представлены в табл. 1–4.

Результаты исследований показали, что образцы масел и жиров имеют существенные различия в составе по полиненасыщенным жирным кислотам. Содержание жирных кислот в растительных маслах существенно ниже, за исключением соевого, оно более калорийно.

В соответствии с «Нормами физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» [10] потребность в полиненасыщенных жирных кислотах составляет для взрослых 6–10 %, а для детей – 5–10 % от калорийности суточного рациона.

Полиненасыщенные жирные кислоты омега-3 и омега-6 оказывают наиболее эффективное позитивное воздействие на организм человека [7]. По этому признаку наиболее эффективным является льняное масло (58,8 % омега-3 и 15,4 % омега-6 по сравнению с 10–16 % омега-3 и 12,6–

- Таблица 2. Массовая доля омега-3 жирных кислот
- Table 2. Omega-3 oil acids content

Содержание омега-3 жирных кислот, масс. %					
Кислоты	жир рыбный пищевой (форель)	жир рыбный пищевой (лосось)	рапсовое масло	льняное масло	соевое масло
C18:3 ω-3 α-Линоленовая	5,2	16,4	7,4	58,7	5,9
C18:4 ω-3 Октадекатетраеновая	0,6	1,8	0	0	0
C20:3 ω-3 Эйкозатриеновая	0,2	0,1	0	0,3	0
C20:4 ω-3 Эйкозатетраеновая	0,4	0,5	0	0	0
C20:5 ω-3 Эйкозапентаеновая (EPA)	0,9	6,7	0	0	0
C22:5 ω-3 Докозапентаеновая	0,4	0,9	0	0	0
C22:6 ω-3 Докозагексаеновая (DHA)	2,3	5,0	0	0	0
Всего	10,0	31,4	7,4	59,0	5,9

- Таблица 3. Массовая доля омега-6 жирных кислот
- Table 3. Omega-6 oil acids content

Содержание омега-6 жирных кислот, масс. %					
Кислоты	жир рыбный пищевой (форель)	жир рыбный пищевой (лосось)	рапсовое масло	льняное масло	соевое масло
C18:2 ω-6 Линолевая	16,6	11,5	21,2	15,4	50,4
C18:3 ω-6 γ-Линоленовая	0,3	0,1	0,1	0	0
C20:2 ω-6 Эйкозодиеновая	0,7	0,4	0,1	0	0
C20:3 ω-6 Эйкозатриеновая (DHGL)	0,4	0,2	0	0	0
C20:4 ω-6 Арахидоновая (ARA)	0,2	0,4	0	0	0
C22:2 ω-6 Докозодиеновая	0,1	0	0	0	0
Всего	18,3	12,6	21,4	15,4	50,4

- Таблица 4. Массовая доля омега-9 жирных кислот
- Table 4. Omega-9 oil acids content

Содержание омега-9 жирных кислот, масс. %					
Кислоты	жир рыбный пищевой (форель)	жир рыбный пищевой (лосось)	рапсовое масло	льняное масло	соевое масло
C18 ω-9 Олеиновая	49,7	20,6	57,0	14,3	25,3
C20:0 ω-9 Эйкозеновая	2,2	4,5	1,2	0,1	0
C22:1 ω-9 Эруковая	0,2	0,8	0,1	0	0
C24:1 ω-9 Нервоновая	0,2	0,6	0,1	0	0
Всего	52,3	26,5	58,4	14,4	25,3

19,3 % омеги-6 в рыбном жире). Оно имеет в своем составе сравнительно небольшое количество насыщенных жирных кислот (10,0 %). При применении льняного масла необходимо следить за его качеством – применяемое в пищу масло не должно иметь в составе избыточное количество эруковой кислоты (более 5 %), которая может на-

капливаться в организме человека и приводить к нарушениям работы сердечно-сосудистой системы и другим неприятным последствиям.

Рыбные жиры характеризуются высоким содержанием омеги-3, омеги-6 и омеги-9, но содержат наибольшую из исследованных образцов массовую долю насыщенных жирных кислот и должны

с осторожностью использоваться в рационе человека. Потребление насыщенных жирных кислот для взрослых и детей должно составлять не более 10 % от калорийности суточного рациона.

Соевое масло является источником в большей степени омега-6. Линолевая кислота и продукты ее метаболизма – одно из защитных средств организма в борьбе с преждевременным старением, сердечно-сосудистыми заболеваниями, артритом, аллергией, аутоиммунными заболеваниями.

Рапсовое масло отличается большим содержанием омега-9. Этот разряд кислот не является незаменимыми, а продуцируется организмом человека. Однако основная из кислот – олеиновая – играет важную роль в обмене веществ, в частности, входит в состав липидов. Особая благотворная роль олеиновой кислоты была отмечена при заболеваниях сердца и ревматоидном артрите.

Для достижения здорового баланса в организме человека необходимо соблюдать рекомендуемые суточные нормы потребления жирных кислот и делать упор на разнообразие своего рациона.

## Заключение

Хроматографический анализ необходимо использовать при оценке состава пищевых масел и жиров, применяемых в качестве биологически активных добавок и лекарственных средств для различных целей на основании «Норм физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».

Выбор хроматографического метода с использованием хроматографа «Кристалл 5000.2» в сочетании с капиллярной ГХ-колонкой DB-FFAP/HP-FFAP/ZB-FFAP показал наилучшие результаты в процессе установления показателей количественного и качественного состава масел и жиров. Применение подобного рода исследований на предприятиях, производящих биологически активные добавки и лекарственные средства на основе масел и жиров, позволяет разрабатывать действенные рекомендации по использованию препаратов, помогая выявить наиболее удачные соотношения полезных компонентов для лечения и профилактики различных заболеваний.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жиры. Химический состав и экспертиза качества / О. Б. Рудаков [и др.] М.: ДеЛи Принт, 2005. 312 с.
2. ГОСТ 31663-2012. Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
3. Экспертиза масел, жиров и продуктов их переработки. Качество и безопасность / Е. П. Корнева [и др.]. Новосибирск: Сибир. университет. изд-во, 2007. 272 с.
4. Жижин Н. А. Применение метода «быстрой» газовой хроматографии для регулярного анализа жирных кислот в молоке и молочных продуктах // Вестн. ВГУИТ. 2020. Т. 82, № 1. С. 164–168.
5. Волгарёв М. Н., Мустафина О. К., Трушина Э. Н. О механизмах действия полиненасыщенных жирных кислот на иммунную систему // Вопросы питания. 2003. № 3. С. 35–40.
6. Таганович А. Д. Биологическая химия. Минск: БИНОМ, 2008. 688 с.
7. Биоактиваторы нового поколения в омолаживающих процедурах / Н. Уколова [и др.] // Kosmetik international. 2018. № 1. С. 21–25.
8. Швейнов А. И. Профилактика аритмических осложнений у пациентов с острым инфарктом миокарда: перспективы применения  $\omega$ -3-полиненасыщенных жирных кислот // Молодежный инновационный вестник: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых-медиков, посвящ. 100-летию ВГМУ им. Н. Н. Бурденко. 2017. Т. 6, № 1. С. 149–151.
9. Комплексное исследование состава экстрактов жира рыб и количественные критерии для различения стандартизированных экстрактов омега-3 полиненасыщенных жирных кислот / И. Ю. Торшин [и др.] // Кардиология. 2020. № 60 (5). С. 1–10.
10. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: метод. реком. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с.
11. Мареев В. Ю. Отчет о работе Совета экспертов «Актуальность применения этиловых эфиров омега-3 полиненасыщенных жирных кислот ( $\omega$ -3 ПНЖК, 90 %, 1 г) у постинфарктных пациентов с сопутствующей кардиологической патологией» // Сердце: журн. для практикующих врачей. 2016. № 15 (4). С. 301.

## REFERENCES

1. Rudakov O. B., Ponomarev A. N., Polyansky K. K., Lyubar A. V. Fats. Chemical composition and quality expertise. Moscow: Delhi Print; 2005. 312 p. (In Russ.).
2. GOST 31663-2012. Vegetable oils and animal fats. Determination by gas chromatography of the mass fraction of methyl esters of fatty acids. Moscow: Standartinform; 2012. 8 p. (In Russ.).
3. Korneva E. P., Kalmanovich S. A., Martovshchuk E. V., et al. Examination of oils, fats and products of their processing. Quality and safety. Novosibirsk: Sib. univ. publishing house; 2007. 272 p. (In Russ.).
4. Zhizhin N. A. Application of the «fast» gas chromatography method for regular analysis of fatty acids in milk and dairy products. Bulletin of VSUIT. 2020;82(1):164–168. (In Russ.).
5. Volgarev M. N., Mustafina O. K., Trushina E. N. On the mechanisms of action of polyunsaturated fatty acids on the immune system. Nutrition issues. 2003;(3):35–40. (In Russ.).
6. Taganovich A. D. Biological chemistry. Minsk: BINOM; 2008. 688 p.
7. Ukolova N., Isaev A., Ambrosova I., Dirsh A., Kostkina E. Bioactivators of a new generation in anti-aging procedures. Kosmetik international. 2018;(1):21–25. (In Russ.).
8. Shveynev A. I. Prevention of arrhythmic complications in patients with acute myocardial infarction: prospects for the use of  $\omega$ -3-polyunsaturated fatty acids. Youth innovation bulletin: Materials of the XI International scientific and practical conference of young medical scientists, dedicated to 100<sup>th</sup> anniversary of N. N. Burdenko VSMU. 2017;6(1):149–151. (In Russ.).
9. Torshin I. Yu., Gromova O. A., Zaichik B. Ts., Ruzhitsky A. O. Comprehensive study of the composition of fish oil extracts and quantitative criteria for distinguishing standardized extracts of omega-3 polyunsaturated fatty acids. Cardiology. 2020;(60):1–10. (In Russ.).
10. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Methodological recommendations. Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2009. 36 p. (In Russ.).
11. Mareev V. Yu. Report on the work of the Expert Council “The relevance of the use of omega-3 polyunsaturated fatty acid ethyl esters ( $\omega$ -3 PUFA, 90 %, 1 g) in postinfarction patients with concomitant cardiological pathology”. Heart: a journal for practicing physicians. 2016;(15):301. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Фомичева Татьяна Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – неорганическая и аналитическая химия, сорбенты, препараты природного происхождения.

**Колужникова Елена Вениаминовна**, кандидат технических наук, доцент института химической переработки биомассы дерева и техносферной безопасности Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С.М. Кирова.

Область научных интересов – неорганическая и аналитическая химия, сорбенты.

**Fomicheva Tatiana I.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – inorganic and analytical chemistry, sorbents, medication of natural origin.

**Koluzhnikova Elena V.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Institute of Chemical Processing of Wood Biomass and Technosphere Safety, St. Petersburg Forestry University named after S.M. Kirov.

Research interests – inorganic and analytical chemistry, sorbents.

Поступила в редакцию 19.01.2023

Поступила после рецензирования 06.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 19.01.2023

Revised 06.02.2023

Accepted 28.02.2023

## Корреляционная обработка пачек импульсов с неизвестными параметрами

**Анатолий Аркадьевич Оводенко<sup>1</sup>**

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

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

practicdsv@yandex.ru

**Александр Федотович Крячко<sup>1</sup>**

✉ alex\_k34.ru@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.** Разработан способ измерения длительностей импульсов по результатам обработки функций взаимной корреляции с эталонным сигналом. Обоснован выбор параметров эталонных импульсов и условий проведения процедур, необходимых для расчета функций взаимной корреляции. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить с точностью до длительности эталонного сигнала временные параметры импульсов в обрабатываемой пачке. Представлены результаты примера аналитического моделирования пачки, содержащей импульсы с неизвестными параметрами. Сформулированы предложения по практической реализации разработанного подхода. Определены допущения, характеризующие точность получаемых оценок. Сформулированы направления дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** функция взаимной корреляции, измерение длительностей импульсов, корреляционная обработка сигналов

**Для цитирования:** Оводенко А. А., Дворников С. В., Крячко А. Ф., Дворников С. С. Корреляционная обработка пачек импульсов с неизвестными параметрами // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 2. С. 110–115. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-110-115.

Original article

## Correlation processing of pulses with unknown parameters

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

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

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

practicdsv@yandex.ru

**Alexander F. Kryachko<sup>1</sup>**

✉ alex\_k34.ru@mail.ru

**Sergei 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.** A method has been developed for measuring pulse durations based on the results of processing cross-correlation functions with a reference signal. The choice of the reference impulses by the parameter and the conditions for carrying out the procedures necessary for calculating the cross-correlation functions is substantiated. An analytical expression has been obtained that makes it possible to estimate, up to the duration of the reference signal, the temporal parameters of pulses in the processed packet. The results of an example of analytical modeling of a burst containing pulses with unknown parameters are presented. Proposals for the practical implementation of the developed approach are formulated. The assumptions characterizing the accuracy of the obtained estimates are determined. Directions for further research are formulated.

**Keywords:** cross-correlation function, measurement of pulse durations, correlation signal processing

**For citation:** Ovodenko A. A., Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Dvornikov S. S. Correlation processing of pulses with unknown parameters. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(2):110–115. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-2-110-115.

## Введение

Методы корреляционной обработки находят широкое применение для измерения временных параметров пачек импульсов [1, 2], в том числе в условиях априорной неопределенности об их длительностях [3, 4]. Несмотря на глубокую проработку данной тематики, подробно рассмотренную в научных изданиях [5–7], отдельные вопросы все еще требуют более детального их анализа. Прежде всего, это обусловлено тем, что в доступной литературе классические методы корреляционных измерений, как правило, рассмотрены с достаточно общих позиций [8], что затрудняет раскрытие их сущности применительно к нестандартным ситуациям.

Поскольку на практике приходится сталкиваться преимущественно с пачками импульсов, параметры которых неизвестны, то в такой ситуации необходимы общие рекомендации, позволяющие по результатам корреляционных функций сделать соответствующие выводы хотя бы о структуре импульсов в обрабатываемой пачке [9–11].

Указанные обстоятельства стимулируют к разработке таких способов обработки сигналов, которые, с одной стороны, позволяли бы получить желаемую оценку результатов измерений, а с другой – не были сложны в их реализации на практике [12]. С учетом сделанных замечаний в статье представлен разработанный подход к оценке временных параметров импульсов, получаемой в результате обработки рассчитанной функции взаимной корреляции в условиях априорной неопределенности их временных параметров.

## Корреляционные измерения временных параметров сигналов

В общем случае в основе оценки временных параметров импульсов лежат процедуры вычисления функции взаимной корреляции (ФВК) [13, 14], которая рассчитывается согласно следующему выражению:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^*(t)y(t \pm \tau) dt, \quad (1)$$

где  $x(t)$  и  $y(t)$  – в общем случае произвольные или действительные, или комплексно сопряженные функции; \* – знак комплексного сопряжения;  $\tau$  – переменная сдвига в интервале  $[-T; T]$ .

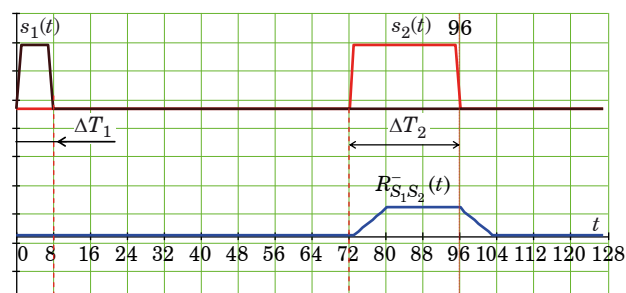
На практике при расчете ФВК используют эталонные сигналы, параметры которых заран-

нее известны. Поэтому результат ФВК оценивают с позиций эталонов. В качестве примера на рис. 1 показаны исходные импульсы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  и их ФВК, полученная как результат расчета по формуле (1).

На рис. 1 демонстрируются временные фрагменты двух импульсов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  с длительностями  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , и их ФВК  $R_{S_1 S_2}^-(t)$  (здесь и далее в качестве иллюстраций используются результаты аналитического моделирования в среде MathCAD, по оси абсцисс представлены дискретные численные отсчеты безразмерного времени).

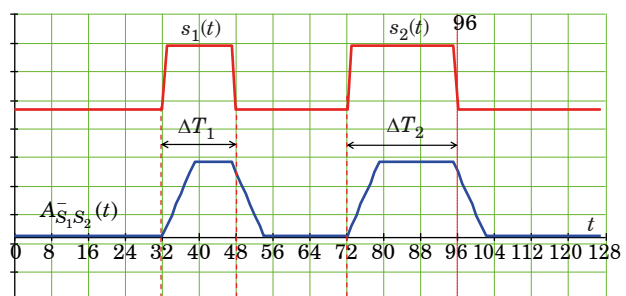
Верхний индекс ФВК  $R_{S_1 S_2}^-(t)$  указывает на знак перед переменной сдвига  $\tau$  в формуле (1), так как именно от знака зависит положение ФВК относительно коррелируемого импульса.

Следует отметить, что представленная ФВК не является остроконечной функцией, поскольку классический остроконечный всплеск обеспечивается только при условии совпадения длительностей коррелируемых импульсов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , т. е. при условии  $\Delta T_1 = \Delta T_2$  [15]. При этом максимальное амплитудное значение ФВК достигается только в случае строгого совпадения интервала корреляции  $[-T; T]$  с длительностями самих импульсов [16, 17].



• Рис. 1. Принцип расчета ФВК импульсов произвольной длительности

• Fig. 1. Principle of Calculation of the Mutual Correlation Function of Pulses of Arbitrary Duration



• Рис. 2. Последовательность из двух импульсов и их автокорреляционная функция

• Fig. 2. A sequence of two pulses and their autocorrelation function



Так как в представленном на рис. 1 примере  $\Delta T_1 < \Delta T_2$ , то форма результирующей функции соответствует усеченной пирамиде.

Приведенный пример наглядно раскрывает целевую проблематику данной статьи. В том случае, если в обрабатываемой пачке импульсы имеют различную длительность, то в условиях отсутствия априорной информации об их параметрах сложно, используя только результат вычисления автокорреляционной функции обрабатываемой пачки, делать выводы об их длительностях.

В качестве примера на рис. 2 показана пачка  $u(t)$ , состоящая из двух импульсов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  различной длительности, и их автокорреляционная функция  $A_{S_1S_2}^-(t)$ .

Очевидно, что в представленном примере результат автокорреляционной функции  $A_{S_1S_2}^-(t)$  не позволит однозначно судить о длительностях импульсов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , поскольку временные параметры  $A_{S_1S_2}^-(t)$  непосредственно не отражают искомым результат. Автокорреляционная функция  $A_{S_1S_2}^-(t)$ , представленная на рис. 2, получена на интервале корреляции, равном шести отсчетам.

Представленный пример подчеркивает необходимость поиска новых подходов к решению задачи оценивания временных параметров импульсов, содержащихся в пачке, в том числе и с использованием ФВК.

### Способ оценки временных параметров импульсов по результатам обработки их ФВК

В предыдущих работах [12, 13] было предложено для оценки длительностей импульсов с неизвестными параметрами использовать результаты совместной обработки их функций корреляции и свертки (с учетом того, что свертка является зеркальным отображением функции корреляции). Применительно к формуле (1) такая процедура предполагает расчет как функции  $A_{S_1S_2}^-(t)$ , так и функции  $A_{S_1S_2}^+(t)$ , поскольку всплески каждой из них как раз и определяют положения переднего и заднего фронтов импульса.

Однако применение такого подхода обосновано лишь в том случае, когда интервал корреляции заведомо меньше длительности импульсов. В противном случае формируемые функции корреляции не будут иметь четкой локализации.

В качестве примера на рис. 3 показаны автокорреляционные функции  $A_{S_1S_2}^-(t)$  и  $A_{S_1S_2}^+(t)$  пачки импульсов  $u(t)$ , полученные на интервале  $[-T; T]$ , равном 32 условным временным отсчетам.

Даже визуальный анализ результатов, продемонстрированных на рис. 3, позволяет сделать заключе-

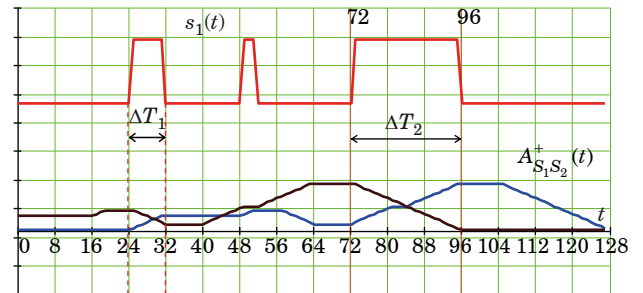
ние, что использование в данном случае функций  $A_{S_1S_2}^-(t)$  и  $A_{S_1S_2}^+(t)$  в качестве инструмента анализа не позволяет получить желаемый результат.

Поэтому проведенные дополнительные исследования показали целесообразность использования ФВК, реализация которой предполагает задействование эталонного сигнала  $v(t)$  с известными параметрами [18, 19].

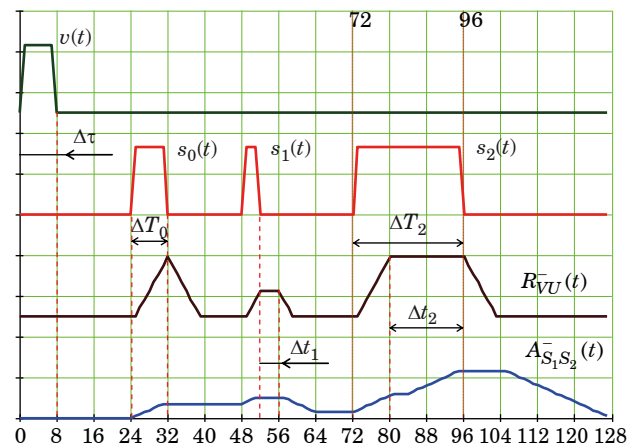
В качестве примера на рис. 4 представлены эпюры, поясняющие сущность разработанного подхода. Показано временное представление эталонного импульса  $v(t)$  длительностью  $\Delta\tau$ ; импульсы  $s_0(t)$ ,  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  из последовательности  $u(t)$ ; взаимная корреляционная функция (ВКУ)  $R_{VU}(t)$  как результат взаимного преобразования функций  $v(t)$  и  $u(t)$ ; автокорреляционная функция  $A_{S_1S_2}^-(t)$  последовательности  $u(t)$ .

Моделирование проведено при длительности окна корреляции, равного 32 условным временным отсчетам.

Визуальный анализ результатов, представленных на рис. 4, позволяет сделать вывод о продуктивности применения процедур расчета ФВК



• Рис. 3. Последовательность  $u(t)$  и ее автокорреляционные функции  
 • Fig. 3. Sequence  $u(t)$  and its autocorrelation functions



• Рис. 4. Эпюры, поясняющие сущность предлагаемого подхода  
 • Fig. 4. Diagrams explaining the essence of the proposed approach

по сравнению с процедурами автокорреляционной обработки. Это обусловлено тем, что знание параметров эталонного импульса  $v(t)$ , в частности его длительности, позволяет по результатам обработки ФВК получать данные о длительностях импульсов в обрабатываемой пачке.

В частности, отклик первой составляющей ФВК представляет собой остроконечную пирамиду. Это указывает на то, что длительности импульсов  $s_0(t)$  и  $v(t)$  равны между собой.

Длительности так называемых «пьедесталов» ФВК  $\Delta T$ , представленных в виде усеченных пирамид, пропорциональны длительности эталонного импульса  $v(t)$ . Поэтому при полном совпадении временных параметров  $v(t)$  с одним из импульсов пачки ФВК даст острый пик, как в случае с первым импульсом. А «пьедестал» ФВК, равный длительности эталонного импульса  $\Delta T = \Delta t$ , указывает на то, что длительность коррелируемого импульса в два раза превышает величину, т. е.  $\Delta T = 2\Delta t$ . Другая особенность обработки результатов ФВК связана с оценкой амплитуд усеченных пирамид. Так, на рис. 4 второй отклик меньше, чем все остальные. Это указывает на то, что длительность эталонного импульса изначально была меньше длительности импульса в пачке. В этом случае равенство «пьедестала» и длительности эталона является признаком того, что эталон в два раза шире обрабатываемого импульса.

Таким образом, можно получить выражение, позволяющее по результатам вычисления длительностей «пьедесталов» ФВК  $\{\Delta T\}_N$  (здесь  $N$  – число

импульсов в пачке) рассчитывать длительности импульсов обрабатываемой последовательности:

$$\Delta T = \left\lceil \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right\rceil + 1. \quad (2)$$

Здесь  $\lceil \cdot \rceil$  – знак округления до целого значения.

Заметим, что искомым результатом обеспечивается с точностью до  $\Delta t$ , поэтому величина  $\Delta T$ , рассчитываемая согласно (2), является в общем случае безразмерной.

Для случая, когда импульс короче эталона, в формуле (2) будет знак «минус».

## Заключение

Полученные результаты характеризуют первый этап предстоящего исследования, в ходе которого было определено направление дальнейшей работы. Вместе с тем предлагаемый подход представляет определенный интерес и для практических приложений метрологии. В частности, при автоматизации процедур измерения длительностей импульсов с неизвестными параметрами путем применения пороговых уровней в ходе обработки формируемых ФВК.

При этом авторы в последующих исследованиях основной акцент сделают на применение методов совместной обработки сигналов [20] в интересах детальной проработки предложенного способа с учетом наличия канальных шумов и замираний.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крат Н. М. Применение векторных анализаторов цепей при калибровке задержки в имитаторах сигналов спутниковых радионавигационных систем // Косм. аппараты и технологии. 2020. Т. 4, № 2 (32). С. 116–122.
2. Вашкевич С. А., Крисенко Ю. Ю. Корреляционный способ измерения радиального ускорения аэродинамического объекта // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9, № 5. С. 69–74.
3. Витрик О. Б., Ланцов А. Д. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 4. С. 339–342.
4. Бычков А. В., Славутский Л. А. Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики // Вестн. Чуваш. ун-та. 2018. № 3. С. 24–32.
5. Земельман М. А. Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 228 с.
6. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / пер. с англ. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
7. Володарский В. Я. Метрология. Теория и практика. М. 2000. 207 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
9. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации / А. А. Алексеев, В. А. Аладинский, В. К. Железняк, В. Ф. Комарович, С. В. Дворников // Науч. приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 65–76.
10. Агиевич С. Н., Дворников С. В., Гусельников А. С. Описание сигналов в базах функций сплайн-Виленкина – Крестенсона // Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 52–57.
11. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. 256 с.

12. *Власенко В. И., Дворников С. В., Крячко А. Ф.* Энергетические расчеты в электродинамике: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2020. 192 с.
13. *Крячко А. Ф., Лихачев В. М., Оводенко А. А.* Комплексная математика в задачах прикладной электродинамики: монография. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 268 с.
14. *Дворников С. В., Пшеничников А. В.* Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высш. учеб. завед. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 221–228.
15. *Михайлов В. Ю.* Оценка двумерной функции взаимной корреляции кодированных сигналов // Известия Ин-та инженер. физики. 2012. № 1 (23). С. 37–39.
16. *Корольков А. И., Князева К. С., Шуруп А. С.* Теоретические и экспериментальные исследования корреляционных характеристик сигналов, отраженных вращающимся винтом // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 6. С. 681–689.
17. *Крячко А. Ф., Дворников С. В., Левин Я. Я.* Оценка импульсной характеристики многолучевого канала связи // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. материалов XXIV Междунар. науч. конф.: в 3 ч. Ч. 2. СПб., 2021. С. 119–122.
18. *Денисов В. Е.* Корреляция между входным и выходным сигналами гидроакустического канала связи при входном сигнале в виде высокочастотного акустического импульса с синусоидальной огибающей // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «РАДИОИНФОКОМ – 2019»: сб. науч. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2019. С. 282–287.
19. Компенсация структурных помех в радиочастотных каналах управления робототехнических систем / С. В. Дворников, Е. А. Попов, А. Ф. Крячко, С. С. Дворников, С. В. Томашевич // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 11. С. 95–106.
20. Методика оценки устойчивости сети многоканальной радиосвязи на основе решение задачи Коши для системы матричных уравнений Колмогорова, описывающих ее состояние / С. А. Якушенко, С. В. Дворников, А. Ф. Крячко, Е. А. Попов, А. Н. Забело // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 12 (24). С. 112–120.

## REFERENCES

1. Krat N. M. Application of vector network analyzers for delay calibration in signal simulators of satellite radio navigation systems. *Spacecraft and Technologies*. 2020;4(32):116–122. (In Russ.).
2. Vashkevich S. A., Krisenko Yu. Yu. Correlation method for measuring the radial acceleration of an aerodynamic object. *Information-measuring and control systems*. 2011;9(5):69–74. (In Russ.).
3. Vitrik O. B., Lantsov A. D. Correlation method for processing the speckle pattern of signals from single-fiber multi-mode interferometers using charge-coupled devices. *Quantum Electronics*. 2006;36(4):339–342. (In Russ.).
4. Bychkov A. V., Slavutsky L. A. Possibilities of correlation processing of pulsed ultrasonic signals in non-contact vibration control of electric power equipment. *Bulletin of the Chuvash University*. 2018;(3):24–32.
5. Zemelman M. A. *Metrological bases of technical measurements*. Moscow: Publishing house of standards; 1991. 228 p. (In Russ.).
6. Claassen K. B. *Fundamentals of measurements. Electronic methods and devices in measuring technology*; translated from English. Moscow: Postmarket; 2000. 352 p. (In Russ.).
7. Volodarsky V. Ya. *Metrology. Theory and practice*. Moscow: 2000. 207 p.
8. Bendat J., Pearsol A. *Application of correlation and spectral analysis*. Moscow: Mir; 1983. 312 p. (In Russ.).
9. Alekseev A. A., Aladinsky V. A., Zheleznyak V. K., Komarov V. F., Dvornikov S. V. 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.).
10. Agievich S. N., Dvornikov S. V., Guselnikov A. S. Description of signals in the bases of spline-Vilenkin-Christenson functions. *Control. Diagnostics*. 2009;(3):52–57. (In Russ.).
11. Max J. *Methods and technology of signal processing in physical measurements*. Moscow: Mir; 1983. 256 p. (In Russ.).
12. Vlasenko V. I., Dvornikov S. V., Kryachko A. F. *Energy Calculations in Electrodynamics: textbook*. СПб.: Лань; 2020. 192 p. (In Russ.).
13. Kryachko A. F., Likhachev V. M., Ovodenko A. A. *Complex mathematics in the problems of applied electrodynamics: monograph*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2019. 268 p. (In Russ.).
14. 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.).
15. Mikhailov V. Yu. Estimation of the two-dimensional function of cross-correlation of coded signals. *Izvestiya of the Institute of engineering physics*. 2012;(23):37–39. (In Russ.).

16. Korolkov A. I., Knyazeva K. S., Shurup A. S. Theoretical and experimental studies of the correlation characteristics of signals reflected by a rotating propeller. *Acoustic journal*. 2020;66(6):681–689. (In Russ.).
17. Kryachko A. F., Dvornikov S. V., Levin Ya. Assessment of the pulse characteristics of a multipath communication channel. *Wave electronics and infocommunication systems: collection of articles of the Proceedings of the XXIV International scientific conference: in 3 parts. P. 2. SPb.; 2021, pp. 119–122.* (In Russ.).
18. Denisov V. E. Correlation between the input and output signals of a hydroacoustic communication channel with an input signal in the form of a high-frequency acoustic pulse with a sinusoidal envelope. *Actual problems and prospects for the development of radio engineering and infocommunication systems “RADIOINFOCOM – 2019”: collection of scientific articles of the IV International scientific and practical conference. Moscow; 2019, pp. 282–287.* (In Russ.).
19. Dvornikov S. V., Popov E. A., Kryachko A. F., Dvornikov S. S., Tomashevich S. V. Compensation of structural interference in radio frequency control channels of robotic systems. *Radiotekhnika*. 2021;85(11):95–106. (In Russ.).
20. Yakushenko S. A., Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Popov E. A., Zabelo A. N. Methodology for assessing the stability of a multichannel radio communication network based on the solution of the Cauchy problem for a system of Kolmogorov matrix equations describing its state. *Radiotekhnika*. 2021;84(24):112–120. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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.

**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 имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного.

Область научных интересов – телекоммуникационные технологии.

**Крячко Александр Федотович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – телекоммуникационные технологии.

**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 имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного.

Область научных интересов – телекоммуникационные технологии.

**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.

**Dvornikov Sergei 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 – telecommunications technologies.

**Kryachko Alexander F.**, D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Head at the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – telecommunications technologies.

**Dvornikov Sergei 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 – telecommunications technologies.

Поступила в редакцию 31.01.2023

Поступила после рецензирования 13.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 31.01.2023

Revised 13.02.2023

Accepted 28.02.2023

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

- Оводенко А. А.** Синтез антенных систем с квазипараболическими рефлекторами..... 5
- Смешчук Е. А., Щеников Я. А.** Исследование возможности повышения эффективности производственных процессов в приборостроении за счет использования коллаборативных роботов ..... 11
- Назаревич С. А., Меркулова А. Ю.** Организационная робастность как особенность эволюции иерархических структур управления..... 20
- Пузырева В. С., Чабаненко А. В.** Автоматизация системы контроля качества при производстве лакокрасочных изделий..... 25
- Макаров Е. Д.** Обеспечение контроля качества стабилизации положения объектов на основе инновационного технического и метрологического обеспечения..... 30

### РАДИОТЕХНИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Карандашев А. А., Оленев В. Л.** Исследование динамических характеристик в вычислительных сетях с червячной коммутацией..... 36
- Иванов Ю. П.** Метод нелинейной оптимальной спектрально-финитной фильтрации навигационных сигналов в условиях априорной неопределенности ..... 45
- Синёв Н. И., Оленев В. Л.** Разработка методов получения прикладной имитационной модели бортовой сети на основе ее формального описания ..... 52
- До Ф. Х., Ле Ч. Д., Зуйков М. А., Берёзкин А. А., Киричэк Р. В.** Исследование предиктивной аналитики на базе микроконтроллера с применением методов TinyML..... 64

## CONTENTS

### INSTRUMENTATION, METROLOGY, STANDARDIZATION AND QUALITY MANAGEMENT

- Ovodenko A. A.** Synthesis of antenna systems with quasi-parabolic reflectors..... 5
- Smeshchuk E. A., Shchenikov Ya. A.** The research of production processes efficiency increasing possibility in instrumentation through the use of collaborative robots ..... 11
- Nazarevich S. A., Merkulova A. Yu.** Organizational robust as a feature evolutions of hierarchical management structures ..... 20
- Puzyreva V. S., Chabanenko A. V.** Automation of the quality control system in the production of paint and varnish products..... 25
- Makarov E. D.** Ensuring quality control of stabilization of the position of objects based on innovative technical and metrological support ..... 30

### RADIO ENGINEERING, INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES AND COMMUNICATION SYSTEMS

- Karandashev A. A., Olenev V. L.** Investigation of dynamic characteristics in computer networks with wormhole networks ..... 36
- Ivanov Yu. P.** The method of nonlinear optimal spectral-finite filtering of navigation signals under conditions of a priori uncertainty..... 45
- Sinyov N. I., Olenev V. L.** Development of methods for obtaining an applied simulation model of the onboard network based on its formal description..... 52
- Do P. H., Le T. D., Zuikov M. A., Berezkin A. A., Kirichek R. V.** Predictive analytics research based on a microcontroller using TinyML methods..... 64

**Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Коромысли-  
ченко В. Н., Охтилев П. А., Зянчурин А. Э.**  
Проблемы обеспечения интеропера-  
бельности при интеграции действующих  
автоматизированных систем управления  
и информационных систем ..... 76

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Небылов А. В., Небылов В. А.** Сравнительный  
анализ концепций построения тяжелых  
экранопланов Pelican ULTRA, Liberty  
Lifter и «Орлан»..... 84

**Тюринова В. А., Лапшин К. В., Шепета А. П.**  
Использование полигона распределения  
для синтеза алгоритмов моделирования  
числовых информационных потоков..... 98

**Фомичева Т. И., Колужникова Е. В.** Газовая  
хроматография как метод оценки баланса  
полиненасыщенных и насыщенных  
жирных кислот в маслах и жирах  
природного происхождения..... 104

**Оводенко А. А., Дворников С. В., Крячко А. Ф.,  
Дворников С. С.** Корреляционная обработка  
пачек импульсов с неизвестными  
параметрами..... 110

**Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Koromysli-  
chenko V. N., Okhtilev P. A., Zyanchurin A. E.**  
Problems of ensuring interoperability in the  
integration of existing automated control  
systems and information systems ..... 76

**FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED  
RESEARCH**

**Nebylov A. V., Nebylov V. A.** Comparative  
analysis of the concepts of heavy ekranoplanes  
Pelican ULTRA, Liberty Lifter and «Orlan»  
construction..... 84

**Tyurinova V. A., Lapshin K. V., Shepeta A. P.**  
The use of the polygon distribution for the  
synthesis of numerical information flow  
modeling algorithms..... 98

**Fomicheva T. I., Koluzhnikova E. V.** The gas  
chromatography as a method to evaluate  
polyunsaturated and saturated fatty acids  
balance in oils and fats of natural origin..... 104

**Ovodenko A. A., Dvornikov S. V., Kryachko A. F.,  
Dvornikov S. S.** Correlation processing  
of pulses with unknown parameters ..... 110

## **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.guap.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.guap.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 подписи 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.guap.ru/inps/tech\\_tr.pdf](https://fs.guap.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**