

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(133)/2024

6(133)/2024

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

A. Vostrikov

**Publisher**Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Board**

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

M. Buzdalov,

PhD, Researcher, Saint Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD, Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

A. Tyugashev,

Dr. Sc., Professor, Samara, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Yu. Umnitsyna**Layout and composition:** Yu. Umnitsyna**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67A, Bol'shaya Morskaya, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i.us.spb@gmail.com](mailto:i.us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Saveleva M. G., Urbanovich P. P.***Steganographic transformation based on the modification of halftone shades of rasterized documents*

2

**Zhukova N. A., Subbotin A. N.***Dynamic distribution algorithm for image processing in cloud-based intelligent video surveillance systems*

15

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Ivanov M. E., Matasov Yu. F.***Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system*

27

**Osipov V. Y., Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Miloserdov D. I.***Intelligent neurocontrol of news streams with continuous learning*

35

**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Krotov K. V.***Models of mixed integer linear programming for optimizing the inclusion of tasks in packages and the order of operations with them in pipeline systems*

46

**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M.***The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback*

58

**CHRONICLES AND INFORMATION***5th International Science and Technology Conference**"Modern Network Technologies -- MoNeTec-2024". Report*

66

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

68

*Contents of the journal «Informatsionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2024 [№ 1–6]*

71

6(133)/2024

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

## Учредитель

А. А. Востриков

## Издатель

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

## Главный редактор

Е. А. Крук,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

## Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

## Редакционная коллегия:

С. Д. Андреев,

д-р техн. наук, Тампере, Финляндия

В. Г. Анисимов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

М. В. Буздалов,

канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербург, РФ

Л. С. Джайн,

д-р наук, проф., Канберра, Австралия

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,

д-р наук, проф., Риверсайд, США

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

К. Кристоделу,

д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

А. А. Мюльяри,

д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия

К. Е. Самуилов,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Д. Себерри,

д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия

М. Б. Сергеев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Т. Сутикну,

д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия

А. А. Тюгашев,

д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

М. Н. Фаворская,

д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. Е. Храмов,

д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ

А. А. Шалыто,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. П. Шепета,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,

акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

## Редактор: А. Г. Ларионова

## Корректор: Т. В. Звертановская

## Дизайн: М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына

## Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына

## Адрес редакции: 190000, г. Санкт-Петербург,

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,

сайт: <http://i-us.ru>

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Савельева М. Г., Урбанович П. П.

Стеганографическое преобразование на основе модификации  
полутоновых оттенков растриванных документов 2

Жукова Н. А., Субботин А. Н.

Алгоритм динамического распределения обработки изображений  
в облачных системах интеллектуального видеонаблюдения 15

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Иванов М. Е., Матасов Ю. Ф.

Применение нейросетевого регулятора для повышения качества  
переходного процесса системы стабилизации высоты полета  
экраноплана 27

Осипов В. Ю., Кулешов С. В., Зайцева А. А., Милосердов Д. И.

Интеллектуальное нейроуправление новостными потоками  
с непрерывным обучением 35

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Кротов К. В.

Модели смешанного целочисленного линейного программирования  
оптимизации включения заданий в пакеты и порядков  
проведения операций с ними в конвейерных системах 46

## КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M.

The impact of the number of unique preambles on the stability  
region of the ALOHA algorithm with early feedback 58

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Итоги Международной конференции MoNeTec-2024

по сетевым технологиям и искусственному интеллекту 66

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы»

за 2024 г. [№ 1–6] 71



## Стеганографическое преобразование на основе модификации полутоновых оттенков растриваемых документов

М. Г. Савельева<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0009-0000-3250-8317](https://orcid.org/0009-0000-3250-8317)

П. П. Урбанович<sup>а,б</sup>, доктор техн. наук, профессор, [p.urbanovich@belstu.by](mailto:p.urbanovich@belstu.by)

<sup>а</sup>Белорусский государственный технологический университет, Свердлова ул., 13а, Минск, 220006, Республика Беларусь

<sup>б</sup>Люблинский католический университет Иоанна Павла II, Рацлавицке ал., 14, Люблин, 20-950, Польша

**Введение:** всё возрастающую актуальность приобретают исследования, направленные на использование скрытых каналов передачи и хранения информации на основе стеганографии. Одним из видов преобразований электронных текстовых документов является их растривание. Особенности и результат этой операции могут быть положены в основу нового метода стеганографического преобразования. **Цель:** разработать модель и на ее основе синтезировать структурную схему стеганографической системы, а также разработать метод стеганографического преобразования, в которых используется пиксельное представление символов текста-контейнера, полученное при растривании текста. **Результаты:** структура предложенной стеганографической системы основана на использовании особенностей растривания документов-контейнеров. Разработана математическая модель такой системы, базирующаяся на теоретико-множественном представлении основных компонентов системы, а также на мультипараметрическом представлении ключа прямого и обратного стеганографического преобразования. При этом элементы ключа соотносятся, в том числе, с цветовыми и пространственно-геометрическими свойствами и параметрами отдельных пикселей документа-контейнера. Разработаны метод и алгоритмы стеганографического внедрения и извлечения тайной информации, базирующиеся на упомянутой модели. Выполнена сравнительная оценка пропускной способности стегоканала (бит/пиксель), создаваемого на основе предложенного метода. **Практическая значимость:** полученные теоретические результаты отражают общие особенности синтеза и анализа стеганографических систем, преобразования в которых основаны на использовании полутоновых оттенков электронных документов при их растривании. С помощью предложенного метода можно внедрять в растриваемый документ-контейнер тайную информацию для ее передачи, контроля целостности, а также защиты авторских прав на этот документ.

**Ключевые слова** – стеганография, растривание, математическая модель, цвет, полутоновые оттенки, пропускная способность стегоканала.

**Для цитирования:** Савельева М. Г., Урбанович П. П. Стеганографическое преобразование на основе модификации полутоновых оттенков растриваемых документов. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 2–14. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-2-14, EDN: AOSASL

**For citation:** Saveleva M. G., Urbanovich P. P. Steganographic transformation based on the modification of halftone shades of rasterized documents. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 2–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-2-14, EDN: AOSASL

### Введение

Всё возрастающие объемы данных передаются и хранятся в цифровой форме. Вместе с этим возрастает степень угроз цифровому киберпространству, связанных с несанкционированным копированием, использованием и распространением, а также модификацией информации [1, 2].

Понимая важность проблемы защиты своего интеллектуального труда, авторы стремятся найти и использовать способы и инструментальные средства для ее решения. Именно поэтому стеганография, наука о скрытом размещении и передаче данных, приобретает все большую популярность. С ее помощью можно встраивать секретные (авторские) данные в цифровые документы, тем самым обеспечивая, в том числе,

доказательство прав на интеллектуальную собственность [3–6].

Следует также отметить важную особенность современных информационных технологий, связанную с возможностью интегрировать на одной аппаратно-программной платформе различные компоненты цифрового контента, построенные на различных архитектурных принципах, с использованием различных языков программирования, библиотек и фреймворков.

Объектом нашего исследования служат электронные текстовые документы, подвергающиеся преднамеренным или непреднамеренным конвертациям, в результате чего изменяется исходный (оригинальный) формат документа. Такие документы могут быть рассмотрены как изображения в форматах растровой либо векторной

графики, описываемых с помощью соответствующих пространственно-геометрических и цветовых параметров.

Оригинальный контент может быть преобразован из одного формата графики в другой без согласования с авторами. При различных изменениях и преобразованиях текстовых документов (являющихся контейнерами стеганографической системы) одна из важных проблем связана с растриванием текста: контуры букв становятся нечеткими, а цвет по контуру переходит в градиент.

Как известно, основные принципы векторной графики основаны на математическом аппарате, отличном от математического описания объектов растровой (пиксельной) графики, и связаны с построением линейных контуров, составленных из элементарных кривых, описываемых математическими выражениями [7, 8]. При редактировании элементов векторной графики можно изменять параметры линий, переносить элементы, менять их размер, форму и цвет, и это не отразится на качестве их визуального представления. Кроме того, векторная графика не зависит от разрешения выходных устройств визуализации информации.

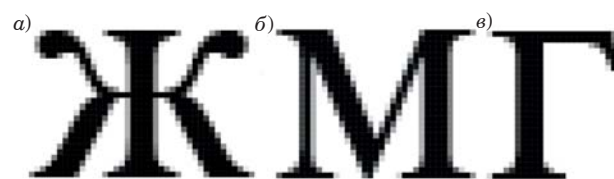
Электронный контент условно можно разделить на три категории: текст, изображение, изображение + текст (включая изображение-текст). Информативная, содержательная основа практически любого документа заключается в семантике текста, который может строиться на основе различных технологий. В свою очередь графемы (иначе — буквы) в векторном формате могут разделяться на различные группы. Такая классификация строчных и прописных графем может основываться, например, на учете совокупности конструктивных особенностей символов (форме штрихов, наличии засечек и др.) [9]. Совокупность упомянутых особенностей называют гарнитурой и шрифтом. При этом все буквы алфавита, например русского языка, условно можно отнести к трем классам (рассматриваем наиболее часто используемую гарнитуру — Times New Roman):

1) буквы имеют относительно сложную форму: содержат верхние выносные и нижние выносные элементы, акценты, хвосты, капли, наплывы, овалы (специфические элементы графем) и т. д., различные комбинации этих элементов (рис. 1, а);

2) буквы имеют простую структуру: горизонтальные или вертикальные штрихи в комбинации с более сложными элементами (рис. 1, б);

3) буквы характеризуются самой простой структурой: большое количество горизонтальных или вертикальных штрихов (рис. 1, в).

Растриванные документы могут быть сохранены в различных форматах в зависимости



■ **Рис. 1.** Примеры растриванных букв, относящихся к первой (а), второй (б) и третьей (в) группам

■ **Fig. 1.** Examples of rasterized letters belonging to the first (а), second (б) and third (в) groups

от потребностей пользователя. Использование особенностей растриванных символов позволяет создавать новые стеганографические методы, обеспечивающие достаточно высокую пропускную способность (отношение объема осаждаемой информации к объему контейнера).

Особенности контура растриванных букв можно использовать для скрытого внедрения тайной информации (цифрового водяного знака) в защищаемый цифровой контент. Чтобы увеличить пропускную способность создаваемого таким образом скрытого канала передачи/хранения данных, можно использовать преобладающие оттенки среди переходных оттенков растриванных символов [9].

Специфика рассматриваемого типа стеганографического преобразования (или стегопреобразования) обуславливает необходимость внесения соответствующих изменений в известные математические модели и структуру стеганографических систем, основанных на модификации цветовых и пространственно-геометрических параметров документов [3–5, 10–16] с учетом их адаптации под содержание процессов внедрения информации в растриванный документ-контейнер, а также извлечения этой информации. Указанные особенности моделирования и структурного построения стеганографических систем определяют объект и предмет исследования в данной статье.

### Общая модель стеганографической системы

Мы определим абстрактную стеганографическую систему (стегосистему)  $SF$  как набор преобразований некоторого пространства, которое включает в себя множество  $\mathbf{M}$  возможных сообщений ( $\mathbf{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ ) и множество  $\mathbf{C}$  возможных контейнеров ( $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$ ) в другое пространство: множество  $\mathbf{S}$  возможных стегосообщений или стегоконтейнеров — файловых документов с размещенными в них сообщениями или цифровыми водяными знаками  $\mathbf{M}$  ( $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_r\}$ ). При этом переход из одного

пространства в другое и наоборот осуществляется с использованием элементов еще одного множества — ключей  $\mathbf{K} = \{K_1, K_2, \dots, K_a\}$ . Для упрощения считаем, что указанные множества являются конечными. При этом  $t \geq nra$ , откуда предполагается, что разным наборам элементов из множеств  $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$  будут соответствовать разные элементы из множества  $\mathbf{S}$ .

Формально процесс встраивания (осаждения) тайных сообщений из  $\mathbf{M}$  в документы-контейнеры из  $\mathbf{C}$  можно описать как преобразование  $\mathbf{F}$  (в общем случае — отображение) в виде декартова произведения:

$$\mathbf{F}: \mathbf{M} \times \mathbf{C} \times \mathbf{K} \rightarrow \mathbf{S}. \quad (1)$$

Каждый стегоконтейнер  $S$  из множества  $\mathbf{S}$  можно отождествлять со скрытым каналом  $SC$  хранения или передачи информации:  $SC \in \mathbf{S}\mathbf{C}$ .

Обратный процесс (извлечение сообщения) из стегоконтейнера описывается функцией  $\mathbf{F}^{-1}$ :

$$\mathbf{F}^{-1}: \mathbf{S} \times \mathbf{K} \rightarrow \mathbf{M}, \mathbf{C}. \quad (2)$$

Строго говоря, здесь мы используем термин «преобразование» в несколько ином значении по сравнению с тем, как это используется в математике. Речь идет о декартовых произведениях не для целых множеств  $(\mathbf{M} \times \mathbf{C} \times \mathbf{K})$ , а лишь для определенной тройки элементов, относящихся к каждому из указанных множеств [14]:  $M \in \mathbf{M}$ ,  $C \in \mathbf{C}$ ,  $K \in \mathbf{K}$  и  $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_t\}$ ,  $\mathbf{F}^{-1} = \{(F_1)^{-1}, (F_2)^{-1}, \dots, (F_t)^{-1}\}$ .

Таким образом, в наиболее общем случае стеганографическая система может быть формально определена следующим выражением:

$$\mathbf{S}\mathbf{F} = (\mathbf{S}\mathbf{C}, \mathbf{C}, \mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{S}, \mathbf{F}, \mathbf{F}^{-1}). \quad (3)$$

В статьях [14, 16] рассмотрено представление множества ключей  $\mathbf{K}$  в виде пересечения подмножеств:  $\mathbf{K} = \{\mathbf{K}_0, \mathbf{K}_{d1}, \mathbf{K}_{d2}\}$ . Основные ключи, относящиеся к подмножеству  $\{\mathbf{K}_0\}$ , определяют базовый метод стеганографического преобразования (например, наименее значащих битов, LSB — Least Significant Bits). Дополнительные ключи первого рода  $\{\mathbf{K}_{d1}\}$  соотносятся с дополнительными преобразованиями осаждаемой в контейнер информации (например, с помехоустойчивым кодированием, сжатием или шифрованием сообщения  $M$ ) и с соответствующим обратным преобразованием при извлечении информации из стегоконтейнера  $S$ ; особенности реализации комбинаций стеганографии с другими методами преобразований рассмотрены, например, в [17–24]. Дополнительные ключи второго рода  $\{\mathbf{K}_{d2}\}$  определяют выбор элементов и параметров до-

кумента-контейнера (цветовых компонентов, отдельных символов текста и т. д.) при выполнении процедур внедрения/извлечения сообщения  $M$ . К примеру, последний тип ключей при использовании метода LSB в качестве базового (определяется ключом из подмножества  $\{\mathbf{K}_0\}$ ) может соотноситься с различными модификациями LSB [5, 15, 25–27]. В частности, в статье [27] для устранения эффекта ложных контуров предлагается использовать компенсацию серой шкалы с учетом особенности зрительной системы человека.

### Модель и структура стеганографической системы при использовании растринированных текстов-контейнеров

Основой предлагаемого решения является многоключевая модель стegosистемы, описываемая соотношениями (1)–(3).

Предлагается далее представить ключи  $\mathbf{K}$  семейством множеств  $\mathbf{K} = \{\mathbf{K}_r, \mathbf{K}_c\}$ , где  $\mathbf{K}_r$  — ключи, определяющие операции подготовки (генерации) сообщения  $M$  к его размещению в выбранном контейнере  $C$  (фрагментация, параметры кодирования, шифрования или сжатия  $M$  или его блоков; иначе — преобразование  $M$  в  $M_r$ ), а  $\mathbf{K}_c$  — множество ключей, определяющих особенности метода внедрения сообщения  $M_r$  (базовый стегометод, количественные характеристики изменения пространственно-геометрических параметров или свойств растринированных символов, фрагментация контейнера и др.). В соответствии с этим преобразования  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{F}^{-1}$ , представленные формальными соотношениями (1) и (2), можно несколько видоизменить:

$$\mathbf{F}: \mathbf{M} \times \mathbf{C} \times \mathbf{K}_r \times \mathbf{K}_c \rightarrow \mathbf{S}; \quad (4)$$

$$\mathbf{F}^{-1}: \mathbf{S} \times \mathbf{K}_r \times \mathbf{K}_c \rightarrow \mathbf{M}, \mathbf{C}. \quad (5)$$

Ключи  $\mathbf{K}_r$  предлагается представить двумя подмножествами:  $\mathbf{K}_{r1}$  и  $\mathbf{K}_{r2}$ . Некоторый ключ  $K_{r1}$  из подмножества  $\mathbf{K}_{r1}$  ( $K_{r1} \in \mathbf{K}_{r1}$ ;  $\mathbf{K}_{r1} \in \mathbf{K}_r$ ) отождествляется с необходимыми операциями преобразования  $M$  в  $M_r$ , а также с типом используемого контейнера  $C$ ; имеется в виду, что растровые электронные документы могут создаваться в форматах PNG, BMP, JPEG и т. д., каждому из которых соответствует отдельный ключ. Некоторый ключ  $K_{r2}$  из подмножества  $\mathbf{K}_{r2}$  ( $K_{r2} \in \mathbf{K}_{r2}$ ;  $\mathbf{K}_{r2} \in \mathbf{K}_r$ ) предлагается использовать для обозначения, собственно, стеганографического преобразования, взятого за основу (например, LSB, дискретного косинусного преобразования, дискретного вейвлет-преобразования и т. д.).

В свою очередь ключи из подмножества  $K_{\Pi}$  представляются в виде четырех новых подмножеств:  $K_{\Pi} = \{K_{\Pi 1}, K_{\Pi 2}, K_{\Pi 3}, K_{\Pi 4}\}$ .

При этом ключ  $K_{\Pi 1}$  ( $K_{\Pi 1} \in K_{\Pi 1}$ ) определяет выбранный цветовой канал в используемой цветовой модели кодирования отдельных пикселей: в модели RGB – это один или из каналов: R (красный), G (зеленый), B (синий), в модели СМУК – соответственно С (циан), М (пурпурный), Y (желтый), К (черный).

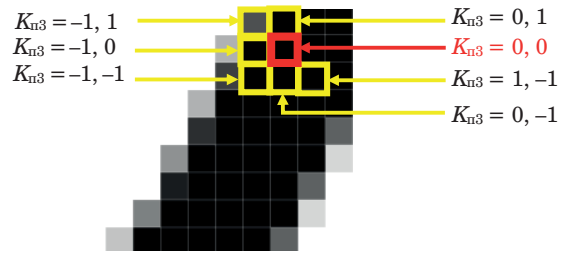
Ключ  $K_{\Pi 2}$  ( $K_{\Pi 2} \in K_{\Pi 2}$ ) будет соотноситься с выбранным (базовым) пикселем или некоторым его параметром. Такой пиксель создает своеобразную точку отсчета, по отношению к которой определяются параметры или координаты остальных задействованных для осаждения сообщения  $M_r$  пикселей, формирующих структуру буквы. Например, в двумерном растровом массиве некоторому пикселю могут соответствовать координаты  $x, y$  ( $x \in [1, X], y \in [1, Y]$ ). Для каналов в модели RGB диапазон значений для цветовой характеристики (кода) пикселя будет изменяться от 0 до 255, в модели СМУК – от 0 до 100.

Ключу  $K_{\Pi 3}$  ( $K_{\Pi 3} \in K_{\Pi 3}$ ) соответствуют параметры непосредственно стеганографического преобразования, например, выбор канала для внедрения сообщения, порядок преобразования (псевдослучайный порядок или иная последовательность), сдвиг при выборе пикселей для внедрения и т. д. Под сдвигом понимается смещение фокуса для стеганографического преобразования с базового пикселя на пиксель, находящийся на удалении  $(\Delta x, \Delta y)$  от базового. Значение  $\Delta x$  задает сдвиг по горизонтали,  $\Delta y$  – по вертикали;  $(\Delta x, \Delta y) \in K_{\Pi 3}$ :  $\Delta x = K_{\Pi 3, x}$ ,  $\Delta y = K_{\Pi 3, y}$ . Разумно выбирать значение  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в диапазоне  $[-1, 1]$ . При  $K_{\Pi 3} = (0, 0)$  сдвига нет; такой пиксель можно рассматривать как базовый (на рис. 2 обозначен красным контуром), так как больший сдвиг снижает стегостойкость, и факт внедрения информации будет более очевиден для стегоаналитика. Влияние параметров ключа  $K_{\Pi 3}$  на выбор соответствующего пикселя для модификации кода показано на рис. 2.

Известно, что осаждение информации изменяет цветовой код модифицируемого пикселя. При этом следует определять границы диапазона такого изменения, чтобы минимизировать эффективность визуальных и иных атак на стегоконтейнер. Выбор границ диапазона задается ключом  $K_{\Pi 4}$  ( $K_{\Pi 4} \in K_{\Pi 4}$ ).

С учетом описанных преобразований и соответствующих ключей предлагаемую формальную модель стеганографической системы можно представить следующим образом:

$$F: M \times C \times K_{r1} \times K_{r2} \times K_{\Pi 1} \times K_{\Pi 2} \times K_{\Pi 3} \times K_{\Pi 4} \rightarrow S; \quad (6)$$



■ **Рис. 2.** Относительное пространственное положение пикселя в зависимости от ключа  $K_{\Pi 3}$   
 ■ **Fig. 2.** Relative spatial position of a pixel depending on the key  $K_{\Pi 3}$

$$F^{-1}: S \times K_{r1} \times K_{r2} \times K_{\Pi 1} \times K_{\Pi 2} \times K_{\Pi 3} \times K_{\Pi 4} \rightarrow M, C. \quad (7)$$

Дополнительно предлагается использовать два набора функций и соответствующие им множества: функции  $F_E \in F_E$  и  $F_W \in F_W$ .

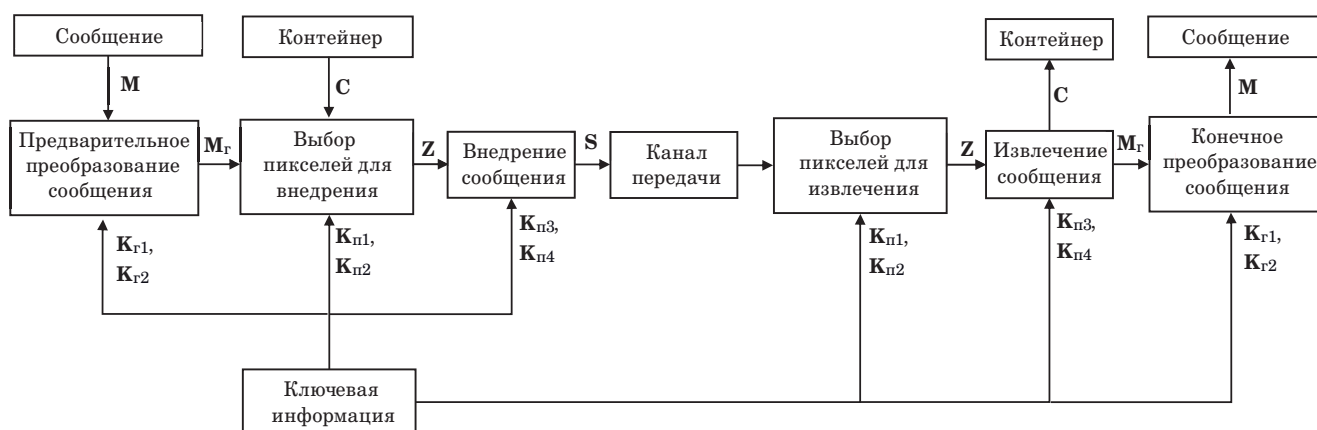
Множество  $F_E$  включает функции  $F_E$ , определяющие выбор пикселей контейнера  $C$  для стеганографического преобразования с учетом определенных ключей. Сформированный в конечном итоге массив пикселей предназначен для размещения тайной информации; обозначим его  $Z, Z \in Z; Z$  – множество возможных массивов, зависящих от различных сообщений, контейнеров, ключей и функций множества  $F_E$ . Функции  $F_W \in F_W$  определяют порядок следования блоков сообщения и соответствующую декомпозицию контейнера на блоки.

Таким образом, стеганографическая система, которая может быть синтезирована на основе рассмотренной модели, формально определяется выражением

$$SF = (SC, C, M, K, S, F, F^{-1}, Z, F_E, F_W). \quad (8)$$

Структурная схема стеганографической системы, построенная на основе модели (8), представлена на рис. 3.

Предложенная модель отличается представлением основных элементов стеганографической системы (сообщения, контейнера, мультинабора ключей) в виде связанных между собой компонентов, учитывающих специфику растрованных текстов-контейнеров. Принятый уровень детализации позволяет упростить определение логических связей между блоками стеганографической системы, реализуемыми в них процессами и в конечном итоге – строить достаточно легкие для программной реализации алгоритмы стеганографического преобразования на базе растрования документа-контейнера.



■ **Рис. 3.** Структурная схема описанной стеганографической системы  
 ■ **Fig. 3.** Structural diagram of the steganographic system

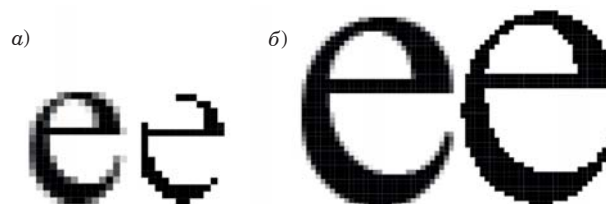
### Стеганографический метод на основе предложенной модели и алгоритмические особенности его реализации

Рассмотрим сущность и алгоритмические особенности реализации метода, основанного на модели (8), при внедрении/извлечении сообщения  $M_r$  с использованием растривания символов документа-контейнера  $C$  в цветовой модели RGB.

Суть метода заключается в изменении оттенков растриванных пикселей. При растривании цвет по контуру переходит в градиент, за счет чего общее количество пикселей для отображения буквы увеличивается. Это происходит в том числе из-за невозможности квадратных матриц пикселей отобразить элементы символов, имеющих наклонные, округлые черты. Именно в эти полутоновые пиксели можно внедрять информацию за счет изменения оттенка.

При растривании цветовые характеристики пикселей принимают 16 оттенков (R, G, B) с кодами от 0 до 255: (0, 0, 0), (17, 17, 17), ..., (255, 255, 255). Так как белый цвет (255, 255, 255) — это фон страницы, то только 15 оттенков используются для отображения символов. Среди последних можно выделить более часто встречающиеся оттенки, которым соответствуют следующие цветовые коды: (17, 17, 17), (34, 34, 34), (68, 68, 68), (102, 102, 102), (136, 136, 136), (153, 153, 153), (187, 187, 187) [28]. Эти особенности примерно в одинаковой степени свойственны преобразованиям файлов из формата PDF в форматы PNG, GIF, TIF, BMP. Черные пиксели (0, 0, 0) являются основой символа и в зависимости от кегля их количество может меняться (рис. 4).

Например, растриванная буква «е» размером 8 пт состоит из 115 цветных пикселей, из которых 54 окрашены в черный цвет (47 % от общего количества), а та же буква размером



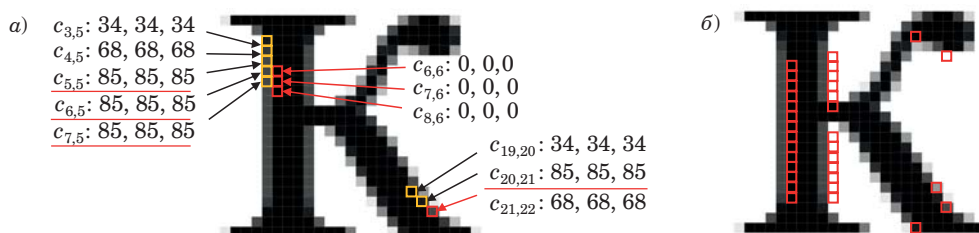
■ **Рис. 4.** Пример растриванного символа размером 8 пт (а) и 20 пт (б) и отображение пикселей черного цвета в нем (справа в каждой паре)  
 ■ **Fig. 4.** An example of a rasterized symbol of size 8 pt (a) and 20 pt (b) and the display of black pixels in it (on the right in each pair)

20 пт состоит из 612 пикселей, из которых 464 черного цвета (75,8 % от общего количества). Кроме того, единичные изменения в монотонных областях (это касается и белого (255, 255, 255)) легче обнаружить.

Отметим, что при определении параметров используемых ключей целесообразно выполнить предварительный анализ распределения отдельных букв по их числу в контейнере  $C$ , относящихся к упомянутым выше группам, а также проанализировать частоты появления пикселей с различными цветовыми кодами. Результат такого анализа дополнительно помогает определить пропускную способность скрытого стегаканала  $SC$  (или информационную емкость контейнера, определяемую допустимым размером осаждаемого сообщения).

Предположим, что контейнером является документ в формате PNG (без сжатия). Преобразованное с использованием ключей  $K_r$  сообщение  $M_r = f(M, K_r)$  будет состоять из трех частей: непосредственно сообщения  $M$ , длины  $L$  сообщения  $M$  в бинарном представлении, числа  $l$  разрядов в  $L$ .





■ **Рис. 5.** Увеличенные копии изображения-контейнера с указанием параметров некоторых пикселей и дополнительным обозначением базовых пикселей (а), а также пикселей, вошедших в массив  $Z$  (б)

■ **Fig. 5.** Enlarged copies of the image-container with the parameters of some pixels indicated and additional designation of the base pixels (а), as well as the pixels included in the  $Z$  array (б)

Важнейшим шагом прямого стегопреобразования в соответствии с выражением (6) является выбор пикселей для осаждения сообщения. Пиксели, которые будут входить в массив  $Z$ , должны иметь одинаковые  $K_{п1}$  и  $K_{п2}$ . Ключ  $K_{п3}$  задает шаг сдвига  $\Delta x$  и  $\Delta y$  (см. рис. 2). Если значение цветового канала  $K_{п1}$  пикселя  $c_{i,j}$  ( $c_{i,j}$  – пиксель, находящийся на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца изображения-контейнера) равно  $K_{п2}$ , то пиксель  $c_{i+\Delta x, j+\Delta y}$  заносится в массив  $Z$ ; при этом  $x = i + \Delta x$  и  $y = j + \Delta y$ . Ключ  $K_{п4}$  задает изменение кодов цветовых каналов пикселя  $c_{i+\Delta x, j+\Delta y}$ , поэтому для увеличения стегостойкости метода  $K_{п4}$  целесообразно выбирать как минимальное нечетное число, кратное шагу разницы градиента серого, полученного при растривании. Исходя из этого  $K_{п4} = 17$ . Примем, что четный цветовой код канала пикселя соответствует биту сообщения «0», нечетный – «1». Нужно также принять во внимание, что при слишком значительном изменении числового кода пиксель, прошедший через стеганографическое преобразование, будет выбиваться из общей палитры документа-контейнера, что негативно влияет на уровень стегостойкости.

Для демонстрации выбора пикселей для массива  $Z$  используем в качестве контейнера черно-белое изображение документа, который состоит из одного символа размером 14 пт. Увеличенная копия символа с дополнительными пояснениями, касающимися координат и цветовых параметров некоторых пикселей, представлена на рис. 5, а. Общий размер изображения – 550 пикселей, из которых белых (цвет фона) – 297, иных оттенков – 253. Примем  $K_{п1} = R$ ;  $K_{п2} = 85$  (по статистике, наиболее часто встречающийся параметр кода);  $K_{п3} = (K_{п3,x}, K_{п3,y})$ ,  $K_{п3,x} = \Delta x = 1$ ,  $K_{п3,y} = \Delta y = -1$  (ключ определяет смещение от базового пикселя по диагонали вправо и вниз на прилегающий пиксель);  $K_{п4} = 17$ .

Здесь значение  $K_{п1}$  выбрано произвольно и может быть изменено на любой другой канал данной цветовой модели (G или B). В соответствии с приведенными на рис. 5, а цветовы-

ми координатами четыре пикселя могут быть отнесены к базовым:  $c_{5,5}$ ,  $c_{6,5}$ ,  $c_{7,5}$  и  $c_{20,21}$  (на рис. 5, а соответствующие коды подчеркнуты). Следовательно, к массиву  $Z$  будут отнесены пиксели, находящиеся вправо и вниз по отношению к базовым в соответствии с ключом  $K_{п3}$ . Они выделены красным контуром. После обработки всего массива пикселей, формирующих исходный документ-контейнер, получим итоговый массив  $Z$ , состоящий из 32 пикселей (рис. 5, б). Как видно из рисунка, в  $Z$  вошли пиксели разнородные по значениям цветовых координат. Обнаружить такой массив – непростая задача.

Дальнейшие преобразования будут происходить в соответствии с алгоритмом, псевдокод которого представлен в листинге 1 (соответствует общему случаю). Здесь используются дополнительные к вышерассмотренным параметры:  $cl$  – цветовой код каналов R, G, B (для серых полутоновых пикселей, полученных в результате растривания, он будет одинаковым во всех каналах);  $Z[p]$  –  $p$ -й элемент массива  $Z$ ;  $M_{r2,p}$  –  $p$ -й символ сообщения  $M_r$  в бинарном виде.

Например,  $M = \text{«Text»}$ , тогда  $L = 4$ ,  $l = 1$ ;  $M_r = \text{«14Text»}$  или в битовом представлении  $M_{r2} = 00110001001101000111010001100101011110001110100$ .

Листинг 1. Псевдокод алгоритма прямого стеганографического преобразования

Listing 1. Pseudocode of the direct steganographic transformation algorithm

**Входные:** изображение-контейнер  $S$ , сообщение  $M$ , ключи  $K_{п1}$ ,  $K_{п2}$ ,  $K_{п3,x}$ ,  $K_{п3,y}$ ,  $K_{п4}$ ;  
**Выходные:** стегоконтейнер  $S$ ;

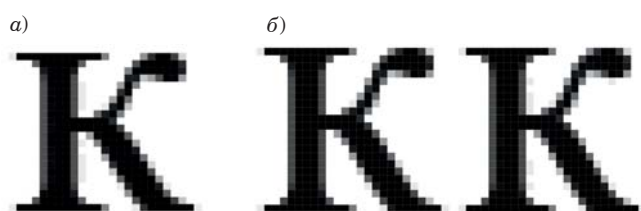
- (1) Вычислить  $L$ ;
- (2) Вычислить  $l$ ;
- (3) Сформировать внедряемое сообщение  $M_r$ :  $M_r = (M, L, l)$ ;
- (4) Перевести  $M_r$  в двоичный формат и принять его за  $M_{r2}$ ;
- (5) Вычислить  $n$  – битовую длину сообщения  $M_{r2}$ ;
- (6) Определить  $X, Y$ ;

(7) Сформировать пустой массив  $Z[]$ ;  
 (8) для  $i$  от 0 до  $X-1$ :  
 (9) для  $j$  от 0 до  $Y-1$ :  
 (10) Определить  $cl(K_{n1}(c_{i,j}))$  – цветовой код канала  $K_{n1}$  пикселя  $c_{i,j}$   
 (11) если  $cl(K_{n1}(c_{i,j})) = K_{n2}$  то  
 (12) записать в массив  $Z[]$  координаты пикселя  $c_{i+kn3,x, j+kn3,y}$   
 (13)  $j = j+1$ ;  
 (14)  $i = i+1$ ;  
 (15) Вычислить  $n_z$  – размер полученного массива  $Z[]$ ;  
 (16) если  $n_z \geq n+1$  тогда  
 (17) для  $p$  от 0 до  $n+1$ :  
 (18) определить  $cl(Z[p])$ ;  
 (19) если  $cl(Z[p]) \% 2 = 1$  то  
 (20) если  $M_{r2,p} = 0$  то  
 (21)  $cl(Z[p]) = cl(Z[p]) + K_{n4}$ ;  
 (22) иначе  
 (23) если  $M_{r2,p} = 1$  то  
 (24)  $cl(Z[p]) = cl(Z[p]) + K_{n4}$ ;  
 (25)  $p = p+1$ ;  
 (26) Сохранить преобразованный стегоконтейнер  $C$  как  $S$ ;

Строки 8–14 листинга 1 реализуют алгоритм создания массива  $Z$ . По окончании работы всего алгоритма будет получен стегоконтейнер  $S$ . На рис. 6 представлены для визуального сравнения исходный  $C$  и заполненный  $S$  контейнеры для рассматриваемого примера. Поскольку массив  $Z$  имеет размер 32, а  $n = 48$ , было использовано два экземпляра контейнера (32 бита сообщения – в первом экземпляре, оставшиеся 16 – во втором). Даже самый тщательный визуальный анализ не позволяет отличить контейнер с внедренной информацией от органического распределения оттенков в исходном контейнере.

Для извлечения внедренного сообщения необходимо создать и заполнить массив пикселей, повторяющий  $Z$  (обозначим его здесь  $Z_D$ ). Для восстановления сообщения  $M$  сначала извлекается первый символ сообщения  $M_{r2}$  – число  $l$ . Исходя из этого далее извлекается  $L$ .

Псевдокод алгоритма обратного стеганографического преобразования представлен в ли-



■ **Рис. 6.** Исходный (а) и заполненный (б) контейнеры  
 ■ **Fig. 6.** Source (a) and filled (b) containers

стинге 2. Здесь используются дополнительные к вышерассмотренным параметры:  $Z_D[p]$  –  $p$ -й элемент массива  $Z_D$ ;  $M_2$  – двоичная форма сообщения  $M$ ;  $s_{i,j}$  – пиксель в изображении-стегоконтейнере  $S$ .

Листинг 2. Псевдокод алгоритма обратного стеганографического преобразования  
 Listing 2. Pseudocode of the inverse steganographic transformation algorithm

**Входные:** стегоконтейнер  $S$ , ключи  $K_{n1}$ ,  $K_{n2}$ ,  $K_{n3,x}$ ,  $K_{n3,y}$ ,  $K_{n4}$ ;  
**Выходные:** сообщение  $M$ ;  
 (1) Создать пустой массив  $Z_D[]$  и пустую строку  $M_2 = ''$ ;  
 (2) Определить  $X, Y, l, L$ ;  
 (3) для  $i$  от 0 до  $X-1$ :  
 (4) для  $j$  от 0 до  $Y-1$ :  
 (5) Определить  $cl(K_{n1}(s_{i,j}))$  – цветовой код канала  $K_{n1}$  пикселя  $s_{i,j}$   
 (6) если  $cl(K_{n1}(s_{i,j})) = K_{n2}$  то  
 (7) Записать в массив  $Z_D[]$  координаты пикселя  $s_{i+kn3,x, j+kn3,y}$ ;  
 (8)  $j = j+1$ ;  
 (9)  $i = i+1$ ;  
 (10) для  $p$  от 0 до 7:  
 (11) Определить  $cl(Z_D[p])$  – цветовой код пикселя  $Z_D[p]$ ;  
 (12)  $l = l || cl(Z_D[p]) \% 2$ ;  
 (13)  $p = p+1$ ;  
 (14) для  $p$  от 8 до 8L:  
 (15) Определить  $cl(Z_D[p])$  – цветовой код пикселя  $Z_D[p]$ ;  
 (16)  $L = L || cl(Z_D[p]) \% 2$ ;  
 (17)  $p = p+1$ ;  
 (18) для  $p$  от  $l(8+1)$  до  $8L+7$ :  
 (19) Определить  $cl(Z_D[p])$  – цветовой код пикселя  $Z_D[p]$ ;  
 (20)  $M = M || (cl(Z_D[p]) \% 2)$ ;  
 (21)  $p = p + 1$ ;  
 (22) Перевести  $M_2$  в текстовый формат,  $M$ ;  
 (23) Сохранение извлеченного сообщения,  $M$ ;

В строках 12, 16 и 20 листинга 2 используется символ в виде двух параллельных вертикальных линий ( $||$ ), соответствующий операции склеивания (конкатенации).

Для анализа пропускной способности стегоканала, создаваемого на основе описанного метода, рассмотрим вариант контейнера в виде текста, соответствующего стандартам оформления: полностью заполненная страница формата А4 ( $21 \times 29,7$  см), сформированная из 898 219 пикселей, со стандартными полями. Используемая гарнитура – Times New Roman.

Полученные границы диапазонов изменения количества полутоновых оттенков при различ-

ных размерах шрифта (кегля) (рис. 7, а и б) могут быть использованы в качестве критерия отнесения символа к соответствующему классу.

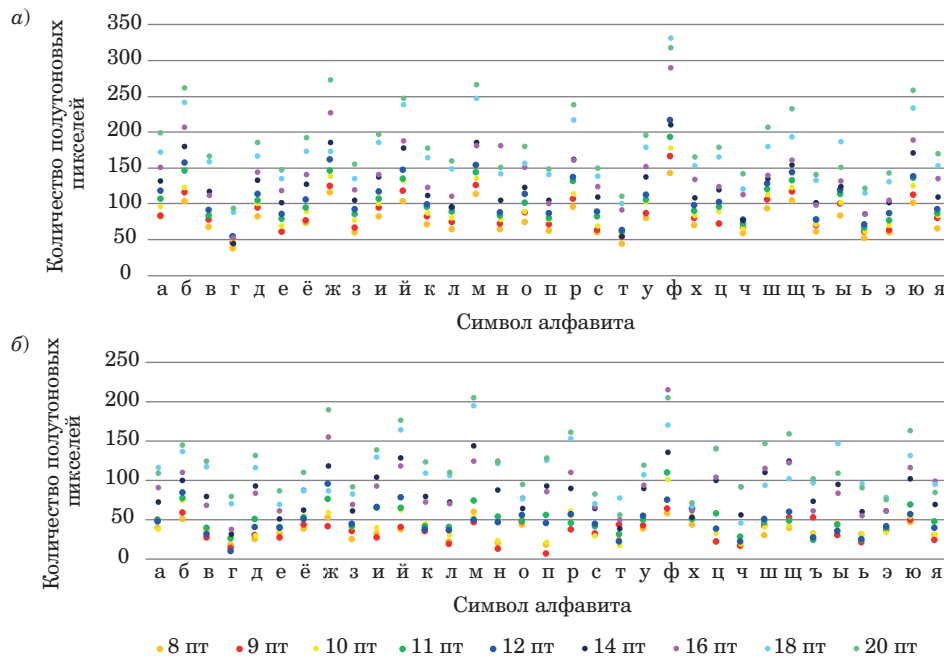
На основе количества полутоновых оттенков каждого растриванного символа в размерах от 8 до 20 пт было рассчитано среднее значение пропускной способности этого символа при условии внедрения одного бита информации в один оттенок. Рассмотрены два варианта: внедрение во все оттенки, кроме белого и черного (см. рис. 7, а), и внедрение только в часто встречающиеся (см. рис. 7, б). Результат представлен в виде гистограммы (рис. 8, а).

Учитывая количество полутоновых оттенков, содержащихся в графеме в зависимости от кегля, в табл. 1 представлена пропускная способность стегаканала, формируемого на основе предложенного метода при внедрении во все полутоновые пиксели и при внедрении только в часто встречающиеся оттенки пикселей, в зависимости от размера шрифта и вероятности (частоты — принято во внимание количество появлений в анализируемом тексте каждой буквы) появления символов русского алфавита [29]. Пропускная способность вычисляется как отношение количества битов для внедрения к общему количеству пикселей контейнера (898 219).

Как видно, при меньшем кегле пропускная способность выше. Чем меньше кегль, тем из меньшего количества чисто черных пикселей будет состоять символ. Мелкие элементы буквы требуют отображения, но из-за растривания теряют черный цвет и приобретают оттенок серого. Таким образом, количество пикселей, которые могут быть использованы для стеганографического преобразования, возрастает.

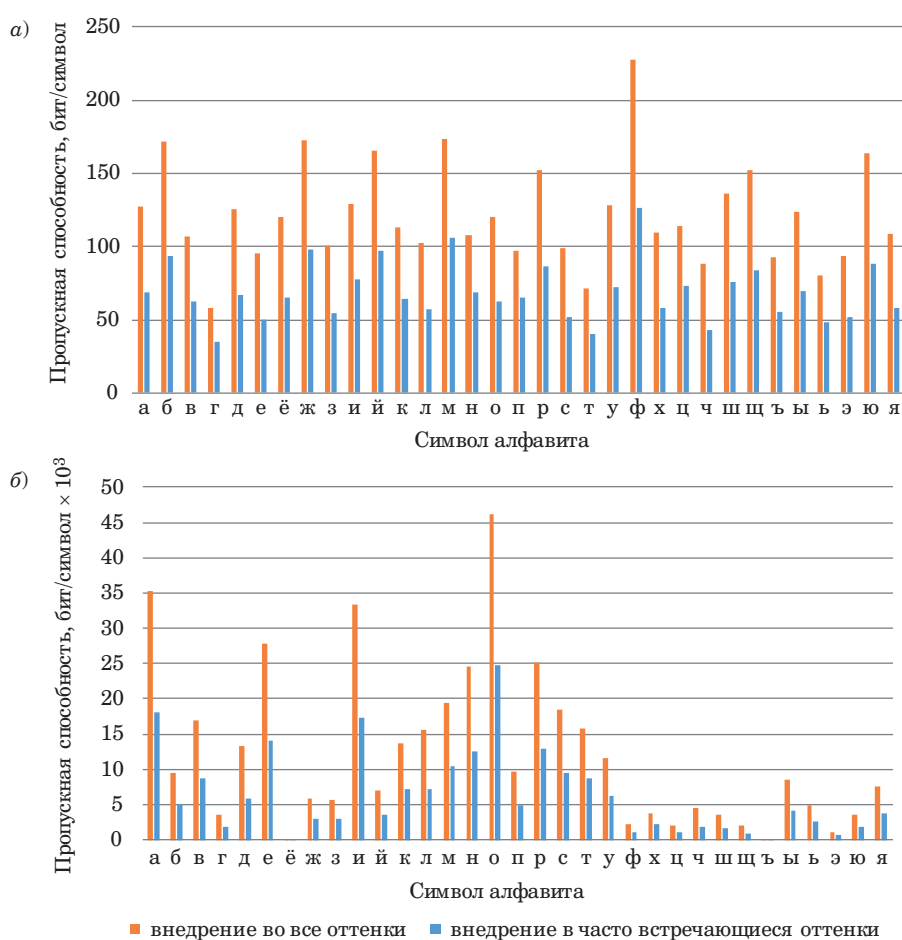
Гистограмма для средней пропускной способности одностраничного текста из анализируемого примера в зависимости от средней пропускной способности символа и частоты его появления представлена на рис. 9, б. Понятно, что большую пропускную способность имеют символы, которые встречаются чаще, т. е. знаки, которым соответствует большая энтропия.

Для оценки метода был проведен анализ пропускной способности создаваемых стегаканалов в сравнении с другими стегаметодами, где в качестве контейнеров используются изображения. По результатам сравнения (табл. 2) можно сделать вывод, что эффективность предложенного метода, оцениваемая пропускной способностью создаваемого стегаканала, либо соответствует известным аналогам, либо превосходит их.



■ **Рис. 7.** Зависимость количества всех полутоновых оттенков (а) и только чаще встречающихся полутоновых оттенков, соответствующих цветовым кодам в каждом канале: 17, 34, 68, 102, 136, 153, 187 (б) от размера шрифта для символов алфавита русского языка

■ **Fig. 7.** Dependence of the number of all half-tone shades (a) and only the most frequently occurring half-tone shades corresponding to color codes in each channel: 17, 34, 68, 102, 136, 153, 187 (b) on the font size for the symbols of the Russian alphabet



■ **Рис. 8.** Пропускная способность одного символа растриванного текста (а) и символов текста-контейнера (б)  
 ■ **Fig. 8.** Bandwidth of one symbol of rasterized text (a) and of text of text-container (b)

■ **Таблица 1.** Пропускная способность стеганографических каналов при сокрытии информации в полутоновых оттенках  
 ■ **Table 1.** Bandwidth of steganographic channels when hiding information in halftone shades

Размер, пт	Печатные символы	Внедрение во все полутоновые оттенки		Внедрение только в часто встречающиеся оттенки	
		Количество битов	Пропускная способность, бит/пиксель	Количество битов	Пропускная способность, бит/пиксель
8	8598	675 962	0,753	364 531	0,406
9	6809	606 127	0,675	299 494	0,333
10	5492	539 873	0,601	274 721	0,306
11	4494	479 024	0,533	266 924	0,297
12	3782	440 937	0,491	227 903	0,254
14	2761	373 852	0,416	244 545	0,272
16	2100	342 526	0,381	228 073	0,254
18	1662	320 081	0,356	221 371	0,246
20	1326	287 762	0,320	201 115	0,224

■ **Таблица 2.** Сравнительная характеристика стеганографических методов  
 ■ **Table 2.** Bandwidth of steganographic methods

Стеганографический метод	Пропускная способность, бит/пиксель	Параметры внедрения
Предложенный метод	0,32–0,75	1 бит на 1 пиксель полутонового оттенка при размерах символов от 20 до 8 пт
Mid Position Value [23]	0,25	1 бит на блок 2 × 2 пикселя
Pixel-Value Differencing [24]	0,50	1 бит на 2 пикселя
Discrete Hadamard Transform [25]	1–8	С ростом пропускной способности снижается стеганографическая стойкость

### Заключение

Особенности и результаты растривания текстовых электронных документов предоставляют хорошие возможности для реализации стеганографических методов размещения тайной информации в этих документах-контейнерах. В статье предложены модель и синтезированная на ее основе структурная схема стеганографической системы, основанные на модификации пространственной области и цветовых параметров пикселей растриванного документа-контейнера. Основу модели составляет теоретико-множественное определение и взаимосвязь основных компонентов системы, представляющей собой совокупность множеств стегоканалов, контейнеров, сообщений и ключей. Последние соотносятся с процедурами подготовки (генерации) сообщения, с особенностями алгоритмов прямого и обратных стегопреобразований, выбором пикселей и модификацией (в процессе внедрения информации) их цветовых кодов и др. Ключевым отличием модели от известных является определение компонент системы с учетом полутонового (в оттенках серого) представления символов контейнера (растривания текста). Из-за естественных вариаций кодов каждого цветового канала отдельно взятого пикселя после растривания изображения, проявляющихся в том, что эти коды не всегда будут одинаковыми (например, может быть (17, 17, 17) в модели RGB, а может быть (17, 18, 17) или (18, 17, 17)), предложенный метод

и реализующие его алгоритмы обеспечивают достаточно высокий уровень стойкости к атакам, направленным на обнаружение и извлечение информации из стегоконтейнера, при высоком уровне пропускной способности создаваемого стегоканала.

Оценка стеганостойкости основывается на следующих постулатах:

- извлечь размещенную в контейнер информацию можно, как правило, зная ключи; особенность метода состоит в использовании многопараметрического ключа преобразования, что значительно снижает эффективность стеганографического;
- при определенных условиях (небольшом размере тайного сообщения, псевдослучайном характере его размещения внутри контейнера и др.) и с учетом того, что даже в оригинальном контейнере после его растривания цветовые коды отдельных пикселей отличаются, выявить осажденное сообщение практически невозможно.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Республики Беларусь в рамках НИР «Методы, алгоритмы и программные средства размещения невидимой идентификационной информации в электронных картах и текстовых документах на основе стеганографии и избыточного кодирования».

### Литература

1. Haas T. C. Adapting cybersecurity practice to reduce wildlife cybercrime. *Journal of Cybersecurity*, 2023, vol. 9, no. 1. doi:10.1093/cybsec/tyad004, EDN: CRUSLY
2. Admass W. S., Munaye Y. Y., Diro A. A. Cyber security: State of the art, challenges and future directions. *Cyber Security and Applications*, 2024, vol. 2, Article 100031. doi:10.1016/j.csa.2023.100031, EDN: DEX-DKS

3. Blinova E. A., Urbanovich P. P. Steganographic method based on hidden messages embedding into Bezier curves of SVG images. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*, 2021, № 3, с. 68–83. doi:10.33581/2520-6508-2021-3-68-83
4. Аграновский А. В., Балакин А. В., Грибунин В. Г. *Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ*: Монография. М., Вузовская книга, 2009. 217 с.

5. Шутько Н. П. Защита авторских прав на электронные текстовые документы методами стеганографии. *Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика*, 2013, № 6 (162), с. 131–134. EDN: TKARYJ
6. Blinova E. A., Stashevskaya I. Y., Urbanovich P. P. A steganographic method of embedding an identifier into the spatial data of an electronic map. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*, 2023, № 1, с. 76–87. doi:10.33581/2520-6508-2023-1-76-87
7. Foley J. D., van Dam A., Feiner S. K., Hughes J. F. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2<sup>nd</sup> ed. C. Addison-Wesley Professional, 1996. 1175 p.
8. Shirley P., Ashikhmin M., Marschner S. *Fundamentals of Computer Graphics*. AK Peters/CRC Press, 2009. 804 p. doi:org/10.1201/9781439865521
9. Савельева М. Г., Урбанович П. П. Использование статистических характеристик растривания текстовых документов в стеганографических приложениях. *Труды БГТУ. Сер. 3: Физико-математические науки и информатика*, 2023, № 2 (272), с. 89–96. doi:10.52065/2520-6141-2023-272-2-13, EDN: ZZMGFZ
10. Cachin C. An information-theoretic model for steganography. *Information and Computation*, 2004, vol. 192, iss. 1, pp. 41–56. doi:10.1016/j.ic.2004.02.003
11. Sallee P. Model-Based Steganography. *International Workshop on Digital Watermarking*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 154–167. doi:10.1007/978-3-540-24624-4\_12
12. Kuznetsov A., Smirnov A., Meleshko E. The mathematical model and flow diagram of the steganography system. *Technika v Silskogospodarskomu Virobnictvi, Galuzevie Mashinobuduvannia, Avtomatizacija*, 2012, no. 1 (25), pp. 273–281.
13. Koptyra K., Ogiela M. R. Key generation for multi-secret steganography. *2015 2nd Intern. Conf. on Information Science and Security (ICISS)*, 14–16 December 2015, Seoul, Korea (South), IEEE, 2015, pp. 1–4. doi:10.1109/ICISSEC.2015.7371013
14. Urbanovich P., Shutko N. Theoretical Model of a Multi-Key Steganography System. *Recent Developments in Mathematics and Informatics. Contemporary Mathematics and Computer Science. Part II Computer Science*. Wydawnictwo KUL, 2016, pp. 181–202.
15. Shutko N., Urbanovich P. P., Zukowski P. A method of syntactic text steganography based on modification of the document-container aprosh. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, R. 94, NR 6, pp. 82–85. doi:10.15199/48.2018.06.15
16. Блинова Е. А. Математическая модель стеганографической системы на основе ключевой информации в виде стеганонаборов. *Системный анализ и прикладная информатика*, 2022, № 3, с. 67–74. doi:10.21122/2309-4923-2022-3-67-74
17. Mumthas S., Lijiya A. Transform domain video steganography using RSA, random DNA encryption and Huffman encoding. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 115, pp. 660–666. doi:10.1016/J.PROCS.2017.09.152
18. Taha M. S., Mohd Rahim M. S., Lafta S. A., Hashim M. M., Alzuabidi H. M. Combination of steganography and cryptography: A short survey. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, vol. 518, no. 5, pp. 052003. doi:10.1088/1757-899X/518/5/052003
19. Majeed M. A., Sulaiman R., Shukur Z. New text steganography technique based on multilayer encoding with format-preserving encryption and Huffman coding. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, vol. 13(12), pp. 163–172. doi:10.14569/IJACSA.2022.0131222
20. Zainal N., Hoshi A. R., Ismail M., Rahem R. T., Wadi S. M. A hybrid steganography and watermark algorithm for copyright protection by using multiple embedding approaches. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2024, vol. 13, no. 3, pp. 1877–1896. doi:10.11591/eei.v13i3.6337
21. Crandall R. Some notes on steganography. *Posted on Steganography Mailing List*, 1998. <http://os.inf.tu-dresden.de/west-feld/crandall.pdf> (дата обращения: 12.07. 2024).
22. Fridrich J., Goljan M., Soukal D. Efficient wet paper codes. *International Workshop on Information Hiding*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 204–218. doi:10.1007/11558859\_16
23. Bierbrauer J., Fridrich J. Constructing good covering codes for applications in steganography. *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security III*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi:10.1007/978-3-540-69019-1\_1
24. Wu D. C., Tsai W. H. A steganographic method for images by pixel-value differencing. *Pattern Recognition Letters*, 2003, vol. 24, no. 9-10, pp. 1613–1626. doi:10.1016/S0167-8655(02)00402-6
25. Zhang Y. Q., Zhong K., Wang X. Y. High-capacity image steganography based on discrete Hadamard transform. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 65141–65155. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181179
26. Sahu A. K., Swain G. A novel multi stego-image based data hiding method for gray scale image. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 753–768.
27. Lee Y. K., Chen L. H. High capacity image steganographic model. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, 2000, vol. 147, no. 3, pp. 288–294. doi:10.1049/ip-vis:20000341
28. Савельева М. Г., Урбанович П. П. Растривание web-документов и использование его характеристик для стеганографической защиты авторских прав на электронный контент. *Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика*, 2023, № 1 (266), с. 54–63. doi:10.52065/2520-6141-2023-266-1-10
29. Ляшевская О. Н. *Частотный словарь современного русского языка (на материалах Национального корпуса русского языка)*. М., Азбуковник, 2009. 1090 с.

UDC 004.56+003.26

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-2-14

EDN: AOSASL

**Steganographic transformation based on the modification of halftone shades of rasterized documents**M. G. Saveleva<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0009-0000-3250-8317P. P. Urbanovich<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-2825-4777, p.urbanovich@belstu.by<sup>a</sup>Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlov St., 220006, Minsk, Republic of Belarus<sup>b</sup>John Paul II Catholic University of Lublin, 14, Raclawickie Al., 20-950, Lublin, Poland

**Introduction:** Research aimed at using hidden channels for transmitting and storing information based on steganography is becoming increasingly important. One of the types of transformations of electronic text documents is their rasterization. The features and result of this operation can be used as the basis for a new method of steganographic transformation. **Purpose:** To develop a model, and on its basis – to synthesize a structural diagram of a steganographic system, as well as to develop a method of steganographic transformation, which uses the pixel representation of container text characters obtained by rasterizing the text. **Results:** The structure of the proposed steganographic system is based on the use of the features of rasterization of container documents. We develop a mathematical model of such a system, based on a set-theoretical representation of the main components of the system, as well as on a multiparametric representation of the key for direct and reverse steganographic transformations. In this case, the elements of the key are related, among other things, to the color and spatial-geometric properties and parameters of individual pixels of the container-document. We also develop a method and algorithms for steganographic embedding and extraction of secret information based on the above-mentioned model. We perform a comparative assessment of the throughput of the steganographic channel (bit/pixel) created on the basis of the proposed method. **Practical relevance:** The obtained theoretical results reflect general features of the synthesis and analysis of steganographic systems, the transformations in which are based on the use of halftone shades of electronic documents when rasterizing the latter. Using the proposed method, it is possible to embed secret information into a rasterized container document for its transmission, integrity control, and protection of copyrights on this document.

**Keywords** – steganography, rasterization, algorithm, mathematical model, color, spatial domain, steganographic methods.

**For citation:** Saveleva M. G., Urbanovich P. P. Steganographic transformation based on the modification of halftone shades of rasterized documents. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 2–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-2-14, EDN: AOSASL

**Financial support**

The investigation was carried out with the financial support of the Government of the Republic of Belarus within the framework of the research project “Methods, algorithms and software for placing invisible identification information in electronic cards and text documents based on steganography and redundant coding”.

**References**

- Haas T. C. Adapting cybersecurity practice to reduce wild-life cybercrime. *Journal of Cybersecurity*, 2023, vol. 9, no. 1. doi:10.1093/cybsec/tyad004, EDN: CRUSLY
- Admass W. S., Munaye Y. Y., Diro A. A. Cyber security: State of the art, challenges and future directions. *Cyber Security and Applications*, 2024, vol. 2, Article 100031. doi:10.1016/j.csa.2023.100031, EDN: DEXDKS
- Blinova E. A., Urbanovich P. P. Steganographic method based on hidden messages embedding into Bezier curves of SVG images. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2021, no. 3, pp. 68–83. doi:10.33581/2520-6508-2021-3-68-83
- Agranovskiy A. V., Balakin A. V., Gribunin V. G. *Steganografiya, tsifrovyye vodyanyye znaki i steganoanaliz* [Steganography, digital watermarking and steganalysis]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2009. 217 p. (In Russian).
- Shutko N. P. Copyright protection of electronic text documents using steganography methods. *Trudy BGTU. № 6. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* [Proceedings of BSTU. No. 6. Physics and Mathematics. Informatics], 2013, no. 6 (162), pp. 131–134 (In Russian). EDN: TKARYJ
- Blinova E. A., Stashevskaya I. Y., Urbanovich P. P. A steganographic method of embedding an identifier into the spatial data of an electronic map. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2023, no. 1, pp. 76–87. doi: 10.33581/2520-6508-2023-1-76-87
- Foley J. D., van Dam A., Feiner S. K., Hughes J. F. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2<sup>nd</sup> ed. C. Addison-Wesley Professional, 1996. 1175 p.
- Shirley P., Ashikhmin M., Marschner S. *Fundamentals of Computer Graphics*. AK Peters/CRC Press, 2009. 804 p. doi:org/10.1201/9781439865521
- Saveleva M. G., Urbanovich P. P. Usage of statistical characteristics of text documents halftone screening in steganographic applications. *Proceedings of BSTU. Issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2023, no. 2 (272), pp. 89–96 (In Russian). doi:10.52065/2520-6141-2023-272-2-13, EDN: ZZMGPZ
- Cachin C. An information-theoretic model for steganography. *Information and Computation*, 2004, vol. 192, iss. 1, pp. 41–56. doi:10.1016/j.ic.2004.02.003
- Sallee P. *Model-Based Steganography*. In: *International Workshop on Digital Watermarking*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 154–167. doi:10.1007/978-3-540-24624-4\_12
- Kuznetsov A., Smirnov A., Meleshko E. The mathematical model and flow diagram of the steganography system, *Tekhnika v Silskogospodarskomu Virobnictvi, Galuzevie Masin-obuduvannia, Avtomatizacija*, 2012, no. 1 (25), pp. 273–281.
- Koptyra K., Ogiela M. R. Key generation for multi-secret steganography. *2015 2nd Intern. Conf. on Information Science and Security (ICISS)*, IEEE, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICISSEC.2015.7371013
- Urbanovich P., Shutko N. *Theoretical Model of a Multi-Key Steganography System*. In: *Recent Developments in Mathematics and Informatics. Contemporary Mathematics and Computer Science. Part II Computer Science*. Wydawnictwo KUL, 2016, pp. 181–202.
- Shutko N., Urbanovich P. P., Zukowski P. A method of syntactic text steganography based on modification of the document-container aprosh. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2018, R. 94, no. 6, pp. 82–85. doi:10.15199/48.2018.06.15
- Blinova E. A. Mathematical model of a steganographic system based on key information in the form of setosets. *System Analysis and Applied Information Science*, 2022, no. 3, pp. 67–74 (In Russian). doi:10.21122/2309-4923-2022-3-67-74
- Mumthas S., Lijiya A. Transform domain video steganography using RSA, random DNA encryption and Huffman encoding. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 115, pp. 660–666. doi:10.1016/J.PROCS.2017.09.152
- Taha M. S., Mohd Rahim M. S., Lafta S. A., Hashim M. M., Alzuabidi H. M. Combination of steganography and cryptography: A short survey. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, vol. 518, no. 5, pp. 052003. doi:10.1088/1757-899X/518/5/052003

19. Majeed M. A., Sulaiman R., Shukur Z. New text steganography technique based on multilayer encoding with format-preserving encryption and Huffman coding. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, vol. 13(12), pp. 163–172. doi:10.14569/IJAC-SA.2022.0131222
20. Zainal N., Hosh A. R., Ismail M., Rahem R. T., Wadi S. M. A hybrid steganography and watermark algorithm for copyright protection by using multiple embedding approaches. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2024, vol. 13, no. 3, pp. 1877–1896. doi:10.11591/eei.v13i3.6337
21. Crandall R. Some notes on steganography. *Posted on Steganography Mailing List*, 1998. Available at: <http://os.inf.tu-dresden.de/west-feld/crandall.pdf> (accessed 20 July 2024).
22. Fridrich J., Goljan M., Soukal D. *Efficient wet paper codes*. In: *International Workshop on Information Hiding*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 204–218. doi:10.1007/11558859\_16
23. Bierbrauer J., Fridrich J. *Constructing good covering codes for applications in steganography*. In: *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security III*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi:10.1007/978-3-540-69019-1\_1
24. Wu D. C., Tsai W. H. A steganographic method for images by pixel-value differencing. *Pattern Recognition Letters*, 2003, vol. 24, no. 9-10, pp. 1613–1626. doi:10.1016/S0167-8655(02)00402-6
25. Zhang Y. Q., Zhong K., Wang X. Y. High-capacity image steganography based on discrete Hadamard transform. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 65141–65155. doi:10.1109/ACCESS.2022.3181179
26. Sahu A. K., Swain G. A novel multi stego-image based data hiding method for gray scale image. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 753–768.
27. Lee Y. K., Chen L. H. High capacity image steganographic model. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, 2000, vol. 147, no. 3, pp. 288–294. doi:10.1049/ip-vis:20000341
28. Saveleva M. G., Urbanovich P. P. Rasterization of web documents and the use of its characteristics for steganographic copyright protection of electronic content. *Proceedings of BSTU. Issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2023, no. 1 (266), pp. 54–63 (In Russian). doi:10.52065/2520-6141-2023-266-1-10
29. Lyashevskaya O. N. *Chastotnyy slovar' sovremennogo russkogo yazyka (na materialakh Natsional'nogo korpusa russkogo yazyka)* [Frequency dictionary of the modern Russian language (based on the materials of the National Corpus of the Russian language)]. Moscow, Azbukovnik Publ., 2009. 1090 p. (In Russian).

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.





## Алгоритм динамического распределения обработки изображений в облачных системах интеллектуального видеонаблюдения

Н. А. Жукова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-5877-4461](https://orcid.org/0000-0001-5877-4461), [nazhukova@mail.ru](mailto:nazhukova@mail.ru)

А. Н. Субботин<sup>б</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-4823-6288](https://orcid.org/0000-0002-4823-6288)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

**Введение:** наличие мощных серверов в облачной среде позволяет облачным системам видеонаблюдения выполнять сложные процессы обработки изображений с применением методов машинного обучения искусственных нейронных сетей, включая нейросетевые методы; кроме того, появляется возможность строить такие процессы в динамике. **Цель:** разработать алгоритм динамической распределенной обработки изображений для интеллектуальной системы видеонаблюдения в облачной среде. **Результаты:** предложен новый алгоритм динамического распределения обработки изображений, позволяющий выполнять сложные синтезированные процессы обработки данных систем видеонаблюдения в облаке, в динамике строить маршруты передачи изображений в облако, а также распределять нагрузку между многими виртуальными машинами. Алгоритм распределения обработки выполняется разработанным оркестратором, который может быть размещен в облаке или в тумане. Полученные результаты обеспечили новые возможности в динамике распределять выполнение синтезированных процессов обработки изображений по разнотипным виртуальным машинам, размещенным на разных физических серверах. **Практическая значимость:** применение полученных результатов на практике при решении задач интеллектуального видеонаблюдения в метрополитене позволило за счет динамического распределения обработки изображений повысить скорость обработки данных (снизить время) более чем в 2,5 раза и за счет применения сложных синтезированных процессов обработки повысить точность определения событий более чем на 11 %.

**Ключевые слова** – распределенная обработка изображений, синтез процессов, облачная среда, логическая модель.

**Для цитирования:** Жукова Н. А., Субботин А. Н. Алгоритм динамического распределения обработки изображений в облачных системах интеллектуального видеонаблюдения. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 15–26. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-15-26, EDN: HNIROD

**For citation:** Zhukova N. A., Subbotin A. N. Dynamic distribution algorithm for image processing in cloud-based intelligent video surveillance systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 15–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-15-26, EDN: HNIROD

### Введение

Повышение быстродействия современных вычислительных средств предоставляет большие возможности для интеллектуальной распределенной обработки информации, в частности обработки видеопоследовательностей [1]. При обработке изображений в настоящее время широко применяются туманные технологии. Обработка видеопоследовательностей с использованием туманных вычислительных сред (туманных сред) рассмотрена в статьях [2–4]. Туманные вычислительные среды имеют ряд преимуществ перед другими вычислительными технологиями (снижение задержек в передаче данных, обеспечение конфиденциальности информации и пр.). Однако обработка данных в туманных вычислительных средах требует значительных финансовых затрат, при этом быстродействие туманных сред напрямую зависит от их стоимо-

сти. В то же время стоимость аренды вычислительных средств в облаке является относительно низкой. Для примера, стоимость владения сервером Cisco UCS C480 ML M5 Deep Learning Rack Server составляет около \$ 15 000 с накладными расходами (электроэнергия и пр.), а стоимость аренды на Microsoft Azure – примерно \$ 100 в месяц. В облаках, как правило, используются дорогие и мощные серверы. Таким образом, в облаке изображения обрабатываются несравнимо быстрее, чем в туманной вычислительной среде, что позволяет выполнять сложные процессы обработки с применением методов машинного обучения искусственных нейронных сетей, включая нейросетевые методы [5–8]. Однако на практике применение заранее построенных процессов обработки оказывается не всегда достаточным при обработке видеопоследовательностей, что обусловлено частым изменением условий, в которых ведется видеонаблюдение. Требуется выполнять

синтез процессов обработки данных в динамике. Динамический синтез процессов позволяет значительно повышать точность обработки за счет учета особенностей данных и условий, в которых обработка выполняется [9]. Однако синтез процессов требует дополнительных вычислительных ресурсов, что может привести к задержкам в обработке данных.

Проблему задержки в обработке данных можно решить за счет распределения обработки между виртуальными машинами (ВМ), используя для этого оркестратор, который в динамике строит маршруты и распределяет нагрузку между многими ВМ. В настоящее время обработка, как правило, выполняется на одном сервере. Существующие алгоритмы динамического распределения данных (оркестровки) между компьютерами (или виртуальными машинами, или контейнерами), такие как Docker, Open VZ, VirtualBox, LXC, Containerd, Vagrant, Microsoft Azure, Kubernetes (K8), Podman, ZeroVM и др., обладают существенным недостатком: невозможностью работать с контейнерами (виртуальными машинами) другого типа, отличного от программы оркестрации [10]. Также следует отметить, что значительное большинство алгоритмов оркестрации представляют коммерческую тайну. Динамическое распределение обработки по многим машинам позволит в разы сократить время, необходимое на обработку изображений в облаке.

Таким образом, с учетом сложности процессов обработки в системах интеллектуального видеонаблюдения, большого объема данных, требующих обработки, а также высокой стоимости использования туманных сред представляется целесообразным значительную часть обрабатывать в облаке. При этом в туманной среде могут выполняться отдельные процессы, в частности предобработка данных, предусматривающая удаление цветности, изменение размерности, глубины и пр., которые должны проходить в непосредственной близости от камер видеонаблюдения.

В статье рассматривается модель данных и логическая модель обработки изображений в облаке, реализованные в виде программных компонент единой системы распределенных вычислений [11], обеспечивающей синтез и выполнение процессов обработки изображений в облачной среде. Предложенное решение отличается от существующих тем, что позволяет в динамике синтезировать процессы обработки и в динамике распределять их проведение по разным ВМ. Поддерживается возможность синтезировать сложные процессы обработки с применением различных алгоритмов машинного обучения, и в том числе искусственных нейронных сетей. При распределении обработки предоставляется возможность работать с разнотипными ВМ и фи-

зическими серверами, а не контейнерами одного типа.

Целью исследования является повышение эффективности облачных систем интеллектуального видеонаблюдения за счет выполнения синтезированных процессов обработки данных на многих ВМ.

В общем виде задача синтеза процессов обработки состоит в нахождении процесса  $P_0$  на заданный момент времени  $t$ , в результате выполнения которого достигается экстремум основного показателя эффективности построения процессов  $E_0$  при ограничениях на вспомогательные показатели  $E_k$ ,  $1 \leq k \leq n$ , где  $n$  — общее число показателей эффективности.

В данной работе для оценки эффективности использованы показатели, разработанные авторами в сотрудничестве со специалистами в области облачного анализа изображений и на основании исследований, представленных в работах [12, 13].

### **Сравнение методов обработки изображений, применяемых в условиях ограничений производительности пользовательского компьютера (устройства)**

В работах [13, 14] рассматриваются различные подходы к обработке видеоданных в облачной среде. Применяются следующие способы передачи видео: постоянное TCP/IP-соединение; постоянное UDP-соединение; использование туманной среды.

При постоянном TCP/IP-соединении чаще всего используется протокол HTTP/HTTPS, видео передается фрагментами от одной секунды до 10 мин и более.

UDP-соединение предполагает трансляцию видеопотока без контроля ошибок, что может привести к снижению качества. Для решения проблемы задержек в канале связи используется буферизация данных.

Благодаря применению туманной среды обеспечиваются возможности буферизировать видео, выполнять синхронизацию кадров из различных источников, кроме того, в туманных средах, как правило, выполняется предварительная обработка данных. Также в туманной среде обеспечивается маршрутизация, необходимая для передачи видео облачному серверу или кластеру серверов по доступным каналам связи.

Обработку данных можно также выполнять и на облачных платформах, предоставляемых такими корпорациями, как Microsoft, Google, Amazon и др., на которых, помимо прочего, доступны вычислительные мощности.

Основными преимуществами использования таких платформ являются возможность установки операционных систем Windows и Linux, подключения по SSH и удаленного администрирования, а также возможность использовать необходимые программы и скрипты. К основным недостаткам относятся ограниченный выбор версий операционной системы Linux, а также доступ по протоколам RDP.

Также ряд компаний предоставляет посреднический доступ к облачным серверам Microsoft, Amazon и др. с собственными настройками.

В целом, можно выделить следующие основные отличия облачных вычислительных сред от туманных. Облачные среды обеспечивают более высокую производительность, предоставляют возможности кластеризации и выделения ресурсов, а также программное обеспечение для управления.

На эффективность обработки изображений с применением машинного обучения оказывают влияние следующие факторы:

- адаптация сервера под задачи машинного обучения (специальный GPU, платы расширения);
- наличие программного обеспечения для оптимизации вычислений и необходимых библиотек (OpenCV, Emgu CV, TensorFlow, Keras);
- возможность установки совместимого программного обеспечения: интерпретатора Python, среды разработки, операционной системы.

В табл. 1 представлен список существующих систем интеллектуального видеонаблюдения и их возможностей:  $p1$  – работа в туманной среде,  $p2$  – работа в облаке,  $p3$  – возможность выполнять обработку на многих машинах,  $p4$  – поддержка видеокамер по коаксиальному кабелю, отличному от TCP/IP,  $p5$  – ограничения на количество камер (не более пяти-восьми, напри-

мер),  $p6$  – поддержка мобильных устройств (смартфонов и пр.),  $p7$  – устойчивость к низким и высоким температурам,  $p8$  – возможности системы применять методы машинного обучения, включая искусственные нейронные сети. Все системы имеют видеорегистраторы, но небольшой емкости по сравнению с туманным сервером или облачным хранилищем. Все системы имеют программу или веб-сайт для удаленного наблюдения. Сравнительный анализ возможностей существующих систем и новой предлагаемой авторами системы SubWatch приведен в табл. 1.

Дополнительная информация о системах доступна на сайтах: Ginzzu (<http://ginzzu.com/>), Ezviz (<https://www.ezviz.com/>), Camdrive (<https://www.camdrive.com/>), PS-link (<https://ps-link.ru/>), Kvadro (<https://4vision.ru/>), Ivue (<https://ivuecamera.com/>), HiWatch (<https://ru-hiwatch.com/>).

### Модели обработки изображений в облачных системах

При описании предлагаемого решения рассматриваются обобщенная и логическая модели обработки изображений в облачных средах. Предлагается новый алгоритм распределенной обработки данных в системах видеонаблюдения, обеспечивающий динамическую маршрутизацию и перенаправление видеопотоков при передаче данных в облако для их последующей обработки.

### Обобщенная модель обработки данных в облачных системах

Обобщенная модель обработки видеопоследовательностей представлена на рис. 1. Установленные на объектах видеокамеры передают изображения по кабелю или оптоволокну через физическую сеть маршрутизаторов с использованием протокола TCP/IP, что позволяет обеспечить низкую нагрузку на каналы связи.

Передаваемые в облако данные размещаются на выделенном сервере с дисковым массивом, обработку данных выполняет центральный облачный сервер. В качестве серверов могут использоваться серверы для установки в стойки, предоставляемые компаниями Cisco, Dell EMC, Fujitsu, Hewlett Packard Enterprise, IBM, Intel, Lenovo, Supermicro, HUAWEI и др. В облачной среде разработчик программного обеспечения работает с «Озером данных» (Data Lake), которое представляет собой абстрактное дисковое пространство. В отличие от других облачных хранилищ, «Озеро данных» обладает способностью к динамическому расширению, которое выполняется по мере необходимости. В настоящее время «Озера данных» применяются в основном

■ **Таблица 1.** Сравнение возможностей систем интеллектуального видеонаблюдения

■ **Table 1.** Comparison of capabilities of intelligent video surveillance systems

Система	Возможность							
	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$	$p5$	$p6$	$p7$	$p8$
1. Ginzzu	–	–	–	–	–	–	–	–
2. Ezviz	–	–	–	–	+	+	–	–
3. Camdrive	–	+	–	–	+	+	–	–
4. PS-link	+	+	+	–	+	+	+	+
5. Kvadro	+	–	–	–	+	+	+	+
6. Ivue	–	–	–	–	–	+	+	–
7. HiWatch	+	–	–	–	+	+	+	+
8. SubWatch	+	+	+	+	+	+	+	+

в случаях, когда требуется использовать модели и методы машинного обучения.

После поступления данных на сервер дальнейшая их обработка реализуется в два условных потока. В первом потоке обрабатываются неструктурированные данные, в большинстве случаев это данные из «Озер данных» [15–18], при этом выполняется обработка первичных видеозаписей в их исходном формате и качестве. Во втором потоке проводятся аналитика и статистическая обработка последовательностей кадров [19], хранящихся в базах данных (MariaDB, MongoDB, PostgreSQL, Microsoft SQL, RavenDB, CouchDB и др.): информация о найденных объектах, выявленных событиях, уровне опасности, принятые меры операторами видеонаблюдения и вспомогательными службами.

Полученные результаты и фрагменты исходных данных предоставляются пользователям или операторам видеонаблюдения в доступном формате через веб-сайт [20], через приложения для мобильных устройств iOS или Android Lnx [21, 22] и автономные приложения, подключаемые к облачному серверу [23, 24]. Веб-сайт позволяет настраивать права доступа к данным для различных пользователей, предоставляет возможность просмотра видеоархива, получения статистики по обнаруженным объектам. При анализе статистических данных может применяться фильтрация по событиям и выполняться построение графиков.

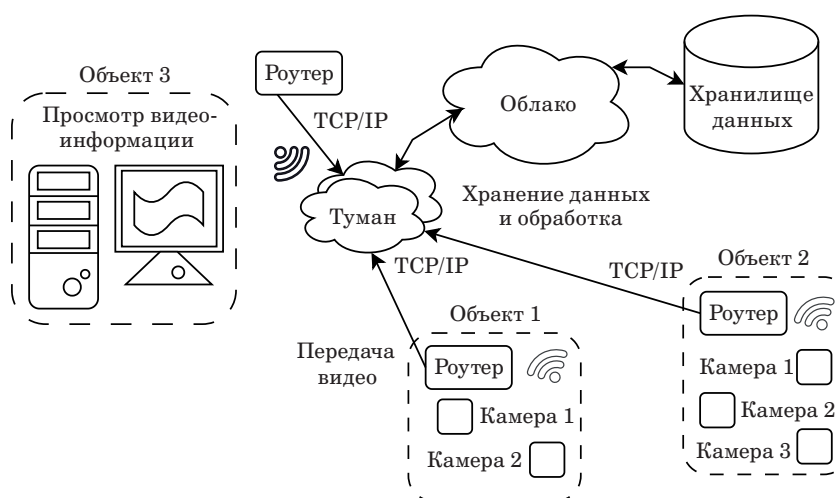
Приложения могут постоянно размещаться в оперативной памяти смартфона [25], обеспечивая своевременное уведомление пользователей о выявленных событиях.

В соответствии с представленной на рис. 1 обобщенной моделью в облако поступают данные от многих устройств. Данные могут быть

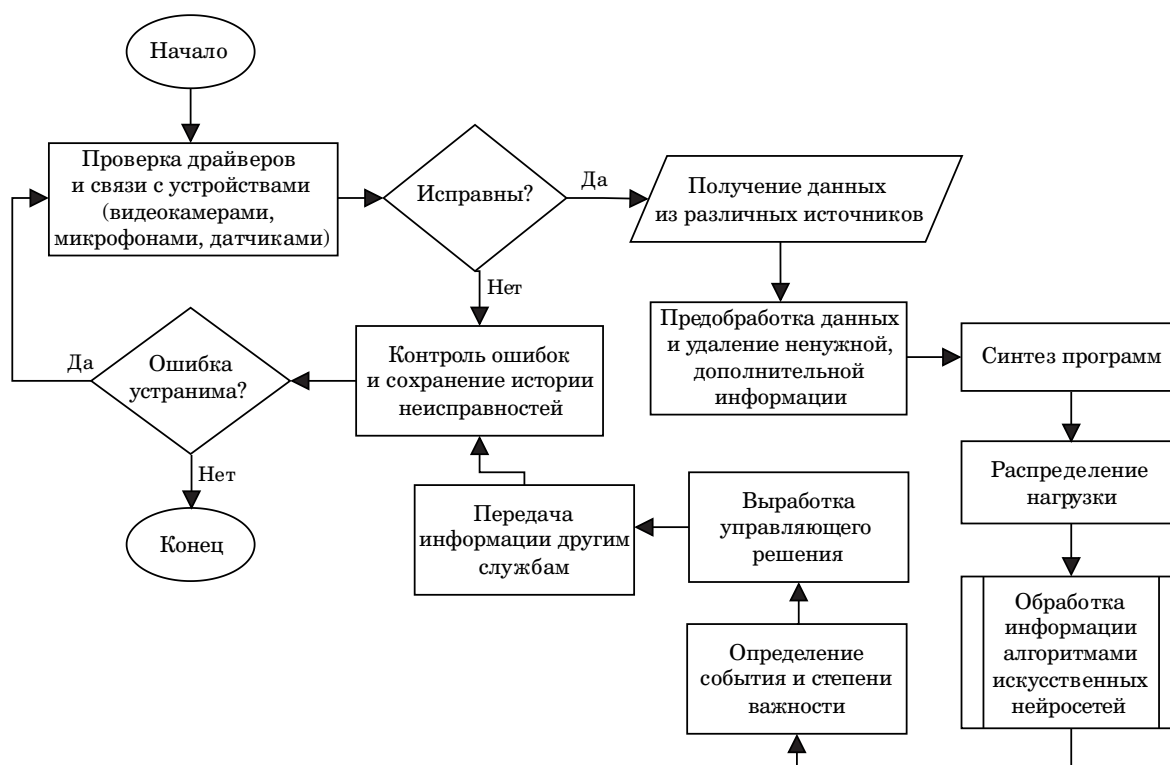
представлены в виде серии кадров, звуковых потоков, результатов измерений с датчиков. С учетом большого объема и разнородности данных необходимо их слияние и обобщение, однако при этом не должна снижаться точность определения событий при обработке данных в облаке. Возможности систем обработки данных позволяют независимо выполнять обработку различных типов данных с учетом их особенностей, а также проводить совместную обработку всех данных или нескольких типов данных [26–28]. Для обработки данных могут использоваться различные алгоритмы, предоставляемые существующими библиотеками машинного обучения, в том числе TensorFlow, OpenNN, NLTK, mlpack, Theano, Matplotlib, Armadillo. Как правило, процессы обработки данных реализуются в несколько этапов согласно стандарту CRISP-DM (CRoss Industry Standard Process for Data Mining, <http://www.crisp-dm.org/>), что предполагает последовательное и (или) параллельное выполнение многих отдельных алгоритмов. При этом в зависимости от результатов, полученных после выполнения каждого из этапов, может возникнуть необходимость в перестройке последующих этапов обработки. Построение и перестройка процессов обработки данных в динамике осуществляются за счет синтеза процессов обработки [29, 30].

В общем виде систему интеллектуального видеонаблюдения можно представить как объекты, соединенные с облачным сервером (см. рис. 1). Следует отметить, что для решения отдельных задач, в первую очередь задач, относящихся к предобработке, могут использоваться туманные вычислительные средства.

В основу алгоритма обработки данных систем видеонаблюдения положены методы синтеза [31–33] (рис. 2). Алгоритм в режиме выполнения



■ **Рис. 1.** Обобщенная модель систем обработки видеопоследовательностей  
 ■ **Fig. 1.** Generalized logical model of video image processing systems



■ **Рис. 2.** Алгоритм обработки данных системы видеонаблюдения  
 ■ **Fig. 2.** The algorithm for processing data of the video surveillance system

обработки данных предусматривает реализацию следующих шагов. На первом шаге осуществляется загрузка программного обеспечения в облако (Старт), проверка драйверов и устройств связи (роутеров, сетевых плат расширений и адаптеров; коммуникационные протоколы, тестовые ответы от устройств должны приходить за отведенное время) с видеокамерами, микрофонами, сенсорами различного предназначения. На следующем шаге осуществляются обмен управляющими сигналами и получение данных из различных источников. Далее анализируются характеристики обрабатываемых данных и условий обработки, оценивается возможность применения для их обработки процессов, построенных или на этапе обучения системы, или ранее при обработке данных. Если существующие процессы не применимы в текущих условиях, то проводится синтез новых процессов обработки или перестройка имеющихся. Например, в процессе синтеза могут исполняться следующие действия: определение алгоритма преобразования данных к единому формату в соответствии с описанием их структуры и состава; выбор алгоритма преобразования данных с учетом их характеристик; выбор архитектуры нейронной сети исходя из обрабатываемых данных и решаемой задачи. Для выполнения синтезированных процессов

осуществляется распределение нагрузки между ВМ. На основе результатов обработки выдается управляющая последовательность. Так, при выявлении события, классифицированного как «пожар», в течение 10 с передается агрегированная информация (0,81; 0,83; 0,85; 0,89; 0,91; 0,93; 0,95; 0,97; 0,96; 0,95) с периодичностью один раз в секунду. Этот процесс представлен на схеме алгоритма как «Определение события и степени опасности». На следующем шаге вырабатывается управляющее решение. Далее информация передается ответственным службам, в рассматриваемом примере пожарным, скорой, полиции и др. На последнем этапе происходит логирование (сохранение информации о событии, принятом решении, дополнительной технической информации).

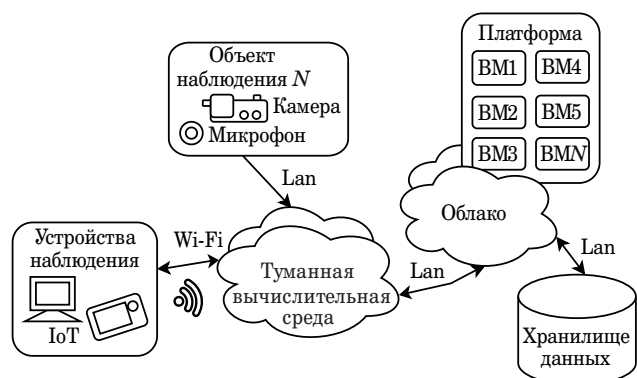
Также на шаг логирования может быть выполнен переход после старта работы алгоритма в случае, если при тестировании устройств были выявлены неисправности. Тогда при логировании сохраняется следующая информация: дата и время обнаружения неисправностей, типы и серийные номера устройств, расположение на объекте наблюдения и категория объекта, причина возможной неисправности и принятые меры для устранения (замена, ремонт, модернизация и пр.).

Для выполнения синтезированных процессов обработки на их основе выполняется синтез программ обработки, при котором определяется схема вызова алгоритмов обработки данных и ее представление в виде машинно-интерпретируемых команд. Более подробно вопросы синтеза программ на основе процессов обработки рассмотрены в работе [34].

### Логическая модель обработки изображений в облачных системах

Предлагаемая распределенная модель для обработки изображений в облаке (сервере) предназначена для использования в системах с клиент-серверной архитектурой. Видеопоследовательности передаются в форме упакованных каталогов с кадрами, дополнительно, также в упакованном виде, передаются служебные данные. Методы, применяемые для передачи данных, например [35], позволяют использовать различные серверы на облачных платформах, но требуется наличие оркестратора (программы-менеджера по распределению данных в облаке) и хранилища информации на облачной платформе. Оркестратор необязательно должен находиться в облаке, он также может размещаться в туманной вычислительной среде (рис. 3).

Облачная платформа предоставляет возможность запуска из браузера серии VM (обычно не более 1000 на одном сервере и не более 12 750 на одном кластере). В качестве операционной системы, как правило, используется Linux (SLES, CentOS, RHL, ALT и пр.), но иногда серверные версии Windows (2016, 2022), которые нельзя отнести к популярным, но которые встречаются у партнеров Microsoft (AWS, Azure и пр.). Работа возможна на группе серверов, соединенных высокопроизводительными оптическими интерфейсами (ANSI/TIA-942-B-1 от TR-42.1), которые рассматриваются как единое целое. При опциональном добавлении видеокарт Nvidia



■ **Рис. 3.** Логическая модель обработки изображений  
 ■ **Fig. 3.** Logical model of image processing

(SoC) и свободных ядер ЦПУ и RAM снижает время, затрачиваемое на обработку данных. Использование серии контейнеров также снижает время на обработку одного кадра. Смартфоны могут использовать серверы подкачки (туманные среды) для мгновенной загрузки контента [36, 37] и снижения ошибок физического уровня при передаче данных – фликеров из-за электро-несогласованности (помех физической природы).

До настоящего времени очень популярными остаются платформы на VK (ВКонтакте Облако), Яндекс (Облако и Диски), МТС (Облако, Экосистема), Сбербанк (Облако и Платформа). Каждое облако предоставляет веб-сайт (платформу) для детального редактирования каждого параметра, начиная от процессора и оперативной памяти до скриптов машинного обучения и отдельных приложений в контейнере.

Операционная система ALT Linux 5.0 Server KDE версии 10.3 (<https://www.basealt.ru/>) на данный момент является самой популярной на облачных платформах в России, поскольку поддерживает стандарты безопасности ГОСТ-2012 в OpenSSL и имеет полную локализацию всех интерфейсов. Для непосредственного создания форм, меню и кодирования применяется интегрированная компонента в системе ALT Linux под названием Lazarus RAD IDE 3.4 DEB 64 bits (<https://www.lazarus-ide.org/>) с догруженными модулями SubEVRT-v.0.17.4a и SubSnpe-v.0.26.71s1, поддерживающими сборку под ALT Linux 5.0, Windows 11 и MacOS Sequoia 15. Предустановленный компонент libmariadb.lib в пакете Lazarus RAD IDE предоставляет объекты для работы с реляционными базами данных для логирования. Хранение основных данных в хранилище происходит по системной команде «ср» (<https://losst.pro/komanda-cp-v-linux>), интегрированной в ядро ALT Linux 5.0.

Контейнер или VM является одним элементом (узлом) в рассматриваемой модели. Для распределения нагрузки между многими VM авторами разработан алгоритм оркестрации (рис. 4). Вначале программа-оркестратор читает настройки в каталоге с программой, затем устанавливает подключения к VM, используя список настроек, которые были сохранены. На следующем шаге оркестратор закачивает пробный пакет по IP-адресу каждой VM с целью определить производительность VM и строит список машин от машин с самой высокой производительностью к машинам с самой низкой производительностью. На следующем шаге происходит динамическое построение маршрута передачи данных и потом динамическое распределение обработки между VM. Далее идет постоянная работа в цикле: загрузка пакета с кадрами и дополнительной информацией, выполнение скрипта на

Python 3.13.0 и TensorFlow 2.18, получение результата (названия объектов, проценты). Если результат получен, тогда результат и характеристики объектов записываются в базу данных и выполняется загрузка следующего пакета на VM. Если результат не получен, тогда выполняется контроль ошибок и завершение работы программы («Конец» на рис. 4).

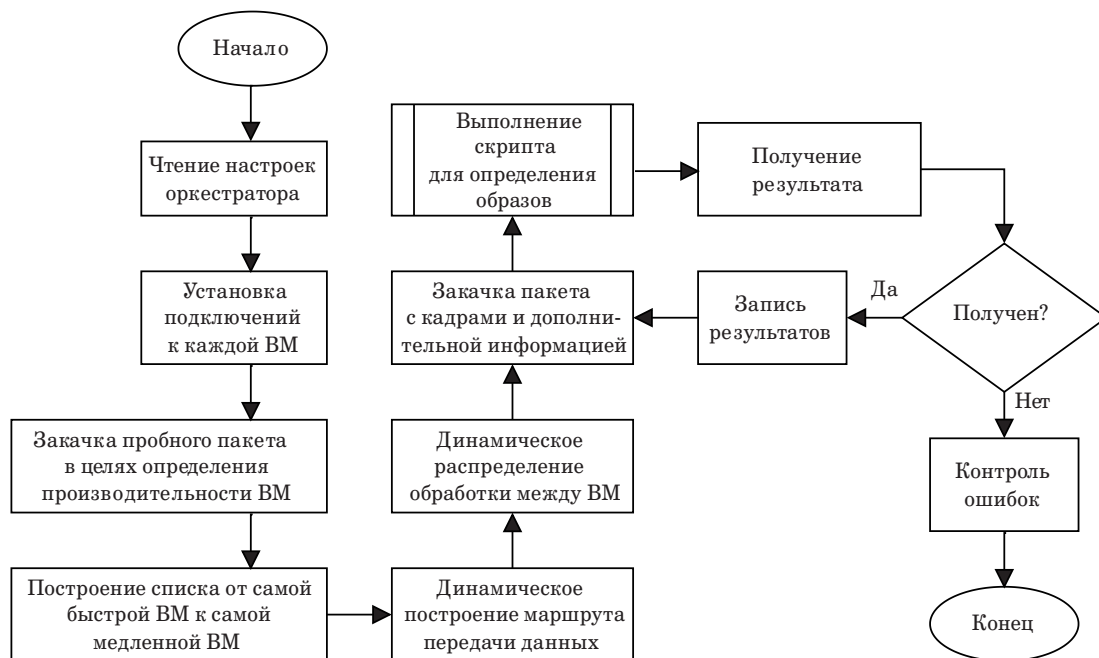
Авторы данного исследования предлагают использовать контейнеры, которые не зависят от платформы, а основываются на VM. Установленная программа на одной VM получает архив кадров (серии JPEG или PNG в зависимости от модели встроенного программного обеспечения в камере). Информация о местоположении камеры (GRPS-координаты, цех, автостоянка, проходная и др.), температуре, давлении, погодных условиях (дождь, снег, ветер и пр.), посторонних предметах (листья, животные и т.д.) передается как файл RSS2.0 и XML1.1 (+KML). Упаковщиком является программа под ALT Linux с названием 7-Zip v.24.08. Файл в архиве с названием info-subvideos.xml, помимо всей перечисленной информации, содержит служебную информацию о модели видеокamеры, фильтрах производителя, которые установлены по умолчанию (синева, зелень, оттенок серого и пр.), технических особенностях фокуса, уровне детализации, типе день/ночь и др.

Виртуальная машина (большой контейнер) с ALT Linux Server 5.0 не выполняет тестирование устройств (поскольку устройства являются

виртуальными, и вторую проверку проходить не обязательно – этим занимается host-система) и сразу запускается из спящего режима, при этом она загружается как большой файл (объект) в стек оперативной памяти. Данный процесс занимает считанные секунды, ничем не уступая контейнерам (например, Docker), но превосходит контейнерные технологии благодаря более стабильной работе (по причине высокой изолированности от других программ). Программа для работы с данными в контейнере запускается мгновенно и ждет подключений от оркестратора из туманной вычислительной среды.

Активация программы из режима ожидания происходит в момент запроса на подключение от оркестратора. При получении архива seria-09-10-2024 xxx.7z происходит распаковка файлов из консоли Linux и обработка скриптом на Python. Имя архива содержит время, дату и случайное число, чтобы имя архива было уникальным.

Протокол HTTP(s) при передаче архивов шифрует информацию (SSL, Russian Trusted Sub CA of The Ministry of Digital Development and Communications) и защищает конфиденциальность данных на промежуточных устройствах (сетевых мониторах, роутерах, маршрутизаторах, sniffерах и пр.). При использовании такого протокола передача информации не вызывает сложностей, поскольку есть модули для работы с HTTP(s) почти на всех языках программирования, а в некоторых случаях поддерживаются объекты из среды разработки, как в Lazarus IDE.



■ **Рис. 4.** Алгоритм работы программы-оркестратора для обработки изображений

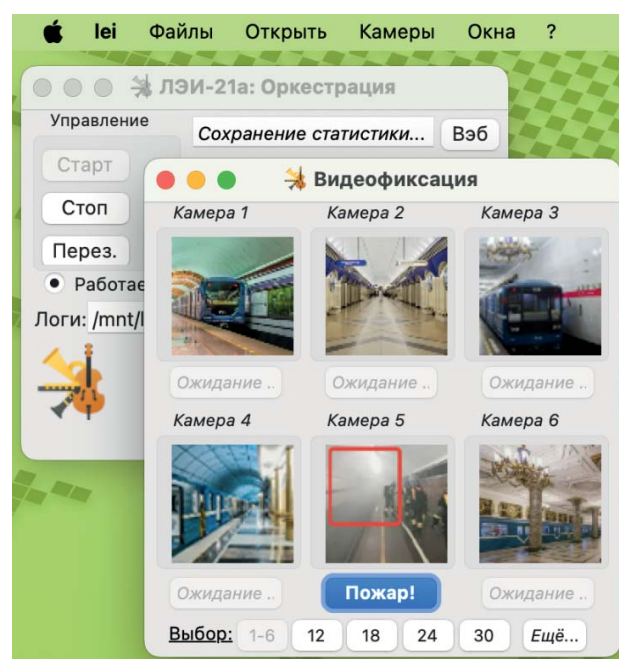
■ **Fig. 4.** Flow chart of the image processing orchestrator program

Результаты обработки данных (кадры и XML-файлы) сохраняются в любом случае (успешно или не успешно прошла обработка). В базе данных MariaDB 11.6.1 сохраняется информация о событиях, например, найденных предметах (объектах). Полную информацию можно получить только с правами администратора на веб-сайте, где в таблицах XHTML v.1.1SE указаны все события с детализацией во всплывающих фреймах. Пользователи облачных систем, например операторы по диагностике событий, используют приложение на смартфоне, которое содержит компонент «браузер». Подключение по HTTP(s) держится постоянно, от чего синхронизация событий между смартфоном и сервером возможна за сотую долю секунды, информация о событии в приложение на смартфоне поступает практически мгновенно. Нет двух этапов: согласования протоколов HTTP(s) и постройки маршрутов TCP/IP.

### Пример применения алгоритма

В настоящий момент в Петербургском метрополитене (<https://www.metro.spb.ru/>) используется система интеллектуального видеонаблюдения (ИСВН) под названием Milestone XProtect Corporate 2016 (<https://www.milestonesys.com/>). В состав системы входят приложение XProtect Smart Client, видеокмеры Axis (<https://www.axis.com/>) и программное обеспечение P-Iris, которое непосредственно установлено на видеокмерах Axis. От каждой видеокмеры Axis идет два потока видеoinформации, один из которых сохраняется на сервере в течение 30 дней, а второй отправляется на видеоперработку, после чего информация поступает в программу для оператора Smart Client под Windows 7. Выявленные системой события просматриваются оператором специального центра управления. Критически важные видеофрагменты дублируются на отдельный резервный сервер.

Авторы исследования разработали новое облачное приложение (рис. 5) для пакетной обработки изображений, представленных в виде серии кадров [37]. Установка и конфигурация приложения выполняются с использованием удаленного рабочего стола, предоставляющего доступ к VM и рабочему окружению KDE. Для этого используются программы Remote Manipulator System (RMS): Netop Remote Control (<http://www.netop.ru/>) и TeamViewer (<https://www.teamviewer.com/>) под управлением ALT Linux Server KDE. Выбор обусловлен программной совместимостью со всеми ведущими операционными системами (Windows, MacOS, FreeBSD, Linux, Cent OS, iOS, Android) и высокой производительностью при



■ **Рис. 5.** Внешний вид разработанной программы для обработки изображений в облачной среде  
 ■ **Fig. 5.** The appearance of the program for processing images in the cloud

работе с различными версиями Linux из сред Windows версий 10/11.

При проведении экспериментальных исследований с использованием разработанного приложения задавались ограничения на мощность вычислительной среды в облаке (не более 15 700 flops), мощность вычислительной среды в тумане (не более 7900 flops), количество VM (не более девяти), производительность памяти (не более 6400), временной интервал, на котором должна быть выполнена обработка, 150–4500 с.

Для оценки эффективности предложенного решения, предполагающего синтез программ обработки изображений и распределенную обработку в облаке, выполнялось сравнение разработанной системы SubWatch с существующими системами, приведенными в табл. 1, и системой ИСВН, используемой в настоящее время для обработки видеоданных в метрополитене.

В качестве исходных данных при проведении экспериментального исследования использовались данные о проникновении лиц в служебные зоны Петербургского метрополитена. Камеры видеонаблюдения располагались в служебных зонах метрополитена. С камер было получено 326 735 пакетов, в каждом из которых была размещена серия кадров (12 к/с). Для обработки данных применялся алгоритм нейросетевой обработки TensorFlow 2.18 (<https://www.tensorflow.org/>) из фреймворка Keras 3.0 (<https://keras.io/>), на-



писанный на языке Python 3.13.0 (<https://www.python.org>) из среды разработки PyTorch 2.5 (<https://pytorch.org>).

Для работы с программой не требуется ручного внесения данных о камерах видеонаблюдения в файлы `cfg-swatch.ini` и `setg-swatch.ini`, так как программа самостоятельно получает необходимую информацию из файла JSON и XML, входящего в состав каждого 7zip-архива с кадрами.

Программное обеспечение было развернуто на нескольких VM, обладающих идентичными техническими характеристиками (Intel Broadwell с Nvidia Tesla v100, 2 vGPU, 8 ГБ ОЗУ, 2048 ГБ SSD). В качестве платформы использовался облачный сервис Yandex.Cloud с предустановленной операционной системой ALT Linux.

В ходе экспериментальных исследований измерялось время обработки изображений при использовании одной, трех и пяти VM. Полученные результаты показали, что при увеличении количества VM время обработки серии изображений уменьшается в среднем в 2,63 раза по сравнению с использованием одной VM. Проведен сравнительный анализ по шести критериям эффективности (табл. 2).

1. Сравнилось время обработки изображений предлагаемой системой и существующими аналогами при обработке данных на пяти VM.

2. Вторым показателем эффективности является точность определения событий. За счет синтеза процессов удалось повысить точность определения событий на 11,25 %.

3. Благодаря использованию оркестратора, обеспечивающего управление передачей данных из одной управляющей программы, сократилось

время передачи данных в 0,91 раза. Время не тратится на согласование протоколов передачи данных.

4. Оперативность принятия решений выросла на 15,3 %, что свидетельствует о повышении скорости реакции системы на события.

5. Важным показателем является также уровень удовлетворенности системой пользователями. Для оценки применялся стандартный опросник лояльности из 100 вопросов. Обработка данных проводилась с помощью сервисов Google Forms (<https://docs.google.com/forms/>) и Google Tables. Полученный результат 33,7 % указывает на положительное восприятие системы пользователями (использовалась 100-балльная шкала).

6. Еще одним показателем, характеризующим эффективность системы, является точность принятия управленческих решений. Данные, предоставленные руководителями подразделений и служб, были агрегированы в Google Tables. Результаты их обработки позволили установить повышение точности принятия решений более чем на 15 %.

## Заключение

В статье рассмотрены модели обработки изображений для облачных систем интеллектуального видеонаблюдения. Авторами предложен логически обоснованный алгоритм, позволяющий выполнять сложные синтезированные процессы обработки данных, предусматривающие применение алгоритмов машинного обучения, в частности нейросетей, на многих VM, развернутых на облачных платформах.

Предлагаемое решение позволяет строить системы интеллектуального видеонаблюдения, которые, в отличие от большинства существующих систем, используют облачную среду для обработки изображений и хранения данных. При обработке данных в облачной среде обеспечивается возможность учитывать характеристики данных и условия их обработки за счет синтеза процессов обработки и их перестройки, что становится возможным благодаря наличию в облаке достаточного объема вычислительных ресурсов. Представленный алгоритм динамического распределения обработки изображений в облачных системах интеллектуального видеонаблюдения обеспечивает сокращение времени передачи данных в облако и их обработки в облачной среде за счет динамического распределения процессов обработки между VM.

Разработано приложение для облачной среды, реализующее пакетную обработку серии кадров с дополнительной информацией. Приложение успешно протестировано на примере обнаруже-

■ **Таблица 2.** Результаты оценки эффективности предлагаемого решения

■ **Table 2.** Results of the evaluation of the effectiveness of the proposed solution

Система	Данные показателей эффективности					
	мс	%	мс	%	%	%
1. Ginzzu	4	0,79	–	–	–	–
2. Ivue	6	0,73	–	–	–	–
3. Camdrive	5	0,81	–	–	–	–
4. PS-link	2	0,94	–	–	–	–
5. HiWatch	3	0,87	–	–	–	–
6. Ezviz	3	0,89	–	–	–	–
7. Kquadro	2	0,91	–	–	–	–
8. Milestone XProtect	2	0,89	132	87	74	83
9. SubWatch	1,283	0,97	120	73	49	76
Больше, чем среднее	2,63	11,25	0,91	15,3	33,7	15

ния незаконного проникновения посторонних лиц в служебные зоны метрополитена; продемонстрировано сокращение времени обработки данных (более чем в 2,5 раза) и повышение точности распознавания событий (на 11 %).

Созданное приложение также способствует повышению оперативности работы сотрудников, удовлетворенности системой пользователей и точности принятия управленческих решений.

Потенциальные области применения данного решения весьма широки: от мониторинга пове-

дения пассажиров на платформах до обработки данных с камер, установленных на различных объектах инфраструктуры, таких как туннели железной дороги, шахты, эскалаторы и служебные помещения.

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке государственного бюджета, проект № FFZF-2022-0006.

### Литература

1. Sarkar S., Chatterjee S., Misra S. Assessment of the suitability of fog computing in the context of internet of things. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2018, no. 6(1), pp. 46–59. doi:10.1109/TCC.2015.2485206
2. Subbotin A. N., Zhukova N. A., Man T. Architecture of the intelligent video surveillance systems for fog environments based on embedded computers, *2021 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO)*, 2021, pp. 1–8. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460270
3. Subbotin A. Data processing in foggy computing environments for machine learning. *2021 II Intern. Conf. on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT)*, 2021, pp. 51–53. doi:10.1109/NeuroNT53022.2021.9472203
4. Subbotin A. Applying machine learning in fog computing environments for panoramic teeth imaging. *2021 XXIV Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2021, pp. 237–239. doi:10.1109/SCM52931.2021.9507120
5. Bhatia J., Patel T., Trivedi H., Majmudar V. HTV dynamic load balancing algorithm for virtual machine instances in cloud. *International Symp. on Cloud and Services Computing*, 2012, pp. 15–20. doi:10.1109/ISCOS.2012.25
6. Saecker M., Markl V. Big data analytics on modern hardware architectures: A technology survey. *Business Intelligence*, 2013, no. 138, pp. 125–149. doi:10.1007/978-3-642-36318-4\_6
7. Yannuzzi M., Milito R., Serral-Graci R., Montero D., Nemirovsky M. Key ingredients in an IoT recipe: fog computing, cloud computing, and more fog computing. *2014 IEEE 19th Intern. Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2014, pp. 325–329. doi:10.1109/CAMAD.2014.7033259
8. Hameed A. R., Islam S., Ahmad I., Munir K. Energy- and performance-aware load-balancing in vehicular fog computing. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2021, no. 30(100454). doi:10.1016/j.suscom.2020.100454
9. Osipov V. Synthesis of effective programs for managing information and computing resources. *Devices and Control Systems*, 1998, no. 12, pp. 24–27.
10. Jaykrushna A., Patel P., Trivedi H., Bhatia J. Linear regression assisted prediction-based load balancer for cloud computing. *2018 IEEE Punecon*, 2019, pp. 1–3. doi:10.1109/PUNECON.2018.8745409
11. Bhatia J., Dave R., Bhayani H., Tanwar S., Nayyar A. SDN-based real-time urban traffic analysis in VANET environment. *Computer Communications*, 2020, no. 149, pp. 162–175. doi:10.1016/j.comcom.2019.10.011
12. Mao Y., You C., Zhang J., Huang K., Letaief K. B. A survey on mobile edge computing: The communication perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, no. 99(1-1), pp. 37–51. doi:10.1109/COMST.2017.2745201
13. Liu Y., Fieldsend J. E., Min G. A framework of fog computing: architecture, challenges, and optimization. *IEEE Access*, 2017, no. 5, pp. 25445–25454. doi:10.1109/ACCESS.2017.2766923
14. Matrouk K., Alatoun K. Scheduling algorithms in fog computing: A survey. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 2021, no. 9(1), pp. 59–74. doi:10.2991/ijndc.k.210111.001
15. Rahm E., Do H. H. Data cleaning: Problems and current approaches. *IEEE Data Eng.*, 2000, no. 23.
16. Huang C., Lu R., Choo K. Vehicular fog computing: architecture, use case, and security and forensic challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2017, no.55(11),pp.105–111. doi:10.1109/MCOM.2017.1700322
17. *Multimedia Big Data Computing for IoT Applications: Concepts, Paradigms and Solutions*/S. Tanwar, S. Tyagi, N. Kumar (Eds.). 2019, vol. 163. 477 p. doi:10.1007/978-981-13-8759-3
18. Gorlatova M., Inaltekin H., Chiang M. Characterizing task completion latencies in multi-point multi-quality fog computing systems. *Computer Networks*, 2020, no. 181(107526). doi:10.1016/j.comnet.2020.107526
19. Aburukba R. O., Landolsi T., Omer D. A heuristic scheduling approach for fog-cloud computing environment with stationary IoT devices. *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, no. 180(102994). doi:10.1016/j.jnca.2021.102994
20. Kimovski D., Math R. Cloud, fog or edge: Where to compute? *IEEE Internet Computing*, 2021, no. 25(4), pp. 30–36. doi:10.1109/MIC.2021.3050613
21. Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city.

- Future Generation Computer Systems*, 2020, no. 112, pp. 630–640. doi:10.1016/j.future.2020.06.016
22. Etemadi M., Ghobaei-Arani M., Shahidinejad A. Resource provisioning for IoT services in the fog computing environment: An autonomic approach. *Computer Communications*, 2020, no. 161, pp. 109–131. doi:10.1016/j.comcom.2020.07.028
23. Zahmatkesh H., Al-Turjman F. Fog computing for sustainable smart cities in the IoT era: Caching techniques and enabling technologies – an overview. *Sustainable Cities and Society*, 2020, no. 59(102139). doi:10.1016/j.scs.2020.102139
24. Bellendorf J., Mann Z. A. Classification of optimization problems in fog computing. *Future Generation Computer Systems*, 2020, no. 107, pp. 158–176. doi:10.1016/j.future.2020.01.036
25. Chen X., Zhou Y., Yang L., Lv L. Hybrid fog/cloud computing resource allocation: Joint consideration of limited communication resources and user credibility. *Computer Communications*, 2021, no. 169, pp. 48–58. doi:10.1016/j.comcom.2021.01.026
26. Kaur M., Aron R. Energy-aware load balancing in fog cloud computing. *Materials today: Proceedings*, 2020. Intern. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.121
27. Wang F., Wang J., Yang W. Efficient incremental authentication for the updated data in fog computing. *Future Generation Computer Systems*, 2021, no. 114, pp. 130–137. doi:10.1016/j.future.2020.07.039
28. Ogundoyin S. O., Kamil I. A. A Fuzzy-AHP based prioritization of trust criteria in fog computing services. *Applied Soft Computing*, 2020, no. 97(106789). doi:10.1016/j.asoc.2020.106789
29. Osipov V. U. *Information Security: Synthesis of Control Programs*. Petrodvorets, VMIRE Publ., 2001. 64 p.
30. Tianxing M., Osipov V., Vodyaho A., Lebedev S., Zhukova N. Distributed technical object model synthesis based on monitoring data. *International Journal of Knowledge and Systems Science*, 2019, no. 10, pp. 27–43. doi:10.4018/IJKSS.2019070103
31. Karagiannis V., Schulte S. Distributed algorithms based on proximity for self-organizing fog computing systems. *Pervasive and Mobile Computing*, 2021, no. 71(101316). doi:10.1016/j.pmcj.2020.101316
32. Dou W., Tang W., Liu B., Xu X., Ni Q. Blockchain-based mobility-aware offloading mechanism for fog computing services. *Computer Communications*, 2020, no. 164, pp. 261–273. doi:10.1016/j.comcom.2020.10.007
33. Zeeshan A., Shehzad A. C., Khalid M., Sahil G., Zhihan L., Yousaf B. Z. A clogging resistant secure authentication scheme for fog computing services. *Computer Networks*, 2021, no. 185(107731). doi:10.1016/j.comnet.2020.107731
34. Bhatia J., Modi Y., Tanwar S., Bhavsar M. Software defined vehicular networks: A comprehensive review. *International Journal of Communication Systems (IJCS)*, 2019, no. 32(12). doi:10.1002/dac.4005
35. Dastjerdi A. V., Gupta H., Calheiros R. N., Ghosh S. K., Buyya R. Fog computing: Principles, architectures, and applications. *Cornell University*, 2016. doi:10.48550/arXiv.1601.02752
36. Бутырский Е. Ю., Водяхо А. И., Жукова Н. А., Субботин А. Н. Облачные системы интеллектуального видеонаблюдения. Логические модели и модель сбора данных. *Информация и космос*, 2022, № 4, с. 74–81. EDN: YEMPW
37. Бутырский Е. Ю., Водяхо А. И., Жукова Н. А., Субботин А. Н. Облачные системы интеллектуального видеонаблюдения. Программное обеспечение. *Информация и космос*, 2023, № 1, с. 45–55. EDN: EXBSEI

UDC 004.032.26

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-15-26

EDN: HNIROD

**Dynamic distribution algorithm for image processing in cloud-based intelligent video surveillance systems**N. A. Zhukova<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-5877-4461, nazhukova@mail.ruA. N. Subbotin<sup>b</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-4823-6288<sup>a</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The presence of powerful servers in the cloud environment allows cloud video surveillance systems to perform complex image processing using machine learning and neural network methods, in addition, it becomes possible to build such processes dynamically. **Purpose:** To develop an algorithm for distributed image processing for an intelligent video surveillance system in a cloud environment. **Results:** We propose a new algorithm for data processing in video surveillance systems, providing a synthesis of complex processes and the widespread use of machine learning and neural network methods. For distributed image processing in the cloud in accordance with the synthesized processes, we use a mathematical model based on scheduling theory. We develop a logical model that determines the methods for transmitting images to the cloud, as well as the organization of virtual machines used in the cloud. Taken together, the obtained results provide new opportunities for the dynamic synthesis of processes in data processing and for the dynamic distribution of their execution across different types of virtual machines located on different physical servers. **Practical relevance:** The practical application of the obtained results in solving problems of intelligent video surveillance in the subway makes it possible to increase the speed of data processing (reduce time) by more than 2.5 times and increase the accuracy of event detection by more than 11%.

**Keywords** – distributed image processing, process synthesis, cloud environment, logical model.

**For citation:** Zhukova N. A., Subbotin A. N. Dynamic distribution algorithm for image processing in cloud-based intelligent video surveillance systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 15–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-15-26, EDN: HNIROD

#### Financial support

This work was supported by the state budget, project No. FFZF-2022-0006.

#### Reference

- Sarkar S., Chatterjee S., Misra S. Assessment of the suitability of fog computing in the context of internet of things. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2018, no. 6(1), pp. 46–59. doi:10.1109/TCC.2015.2485206
- Subbotin A. N., Zhukova N. A., Man T. Architecture of the intelligent video surveillance systems for fog environments based on embedded computers, *2021 10th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO)*, 2021, pp. 1–8. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460270
- Subbotin A. Data processing in foggy computing environments for machine learning, *2021 II Intern. Conf. on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT)*, 2021, pp. 51–53. doi:10.1109/NeuroNT53022.2021.9472203
- Subbotin A. Applying machine learning in fog computing environments for panoramic teeth imaging, *2021 XXIV Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2021, pp. 237–239. doi:10.1109/SCM52931.2021.9507120
- Bhatia J., Patel T., Trivedi H., Majmudar V. HTV dynamic load balancing algorithm for virtual machine instances in cloud, *International Symp. on Cloud and Services Computing*, 2012, pp. 15–20. doi:10.1109/ISCOS.2012.25
- Saecker M., Markl V. Big data analytics on modern hardware architectures: A technology survey, *Business Intelligence*, 2013, no. 138, pp. 125–149. doi:10.1007/978-3-642-36318-4\_6
- Yannuzzi M., Milito R., Serral-Graci R., Montero D., Nemirovsky M. Key ingredients in an IoT recipe: fog computing, cloud computing, and more fog computing, *2014 IEEE 19th Intern. Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2014, pp. 325–329. doi:10.1109/CAMAD.2014.7033259
- Hameed A. R., Islam S., Ahmad I., Munir K. Energy- and performance-aware load-balancing in vehicular fog computing, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2021, no. 30(100454). doi:10.1016/j.suscom.2020.100454
- Osipov V. Synthesis of effective programs for managing information and computing resources, *Devices and Control Systems*, 1998, no. 12, pp. 24–27.
- Jaykrushna A., Patel P., Trivedi H., Bhatia J. Linear regression assisted prediction-based load balancer for cloud computing, *2018 IEEE Punecon*, 2019, pp. 1–3. doi:10.1109/PUNECON.2018.8745409
- Bhatia J., Dave R., Bhayani H., Tanwar S., Nayyar A. SDN-based real-time urban traffic analysis in VANET environment, *Computer Communications*, 2020, no. 149, pp. 162–175. doi:10.1016/j.comcom.2019.10.011
- Mao Y., You C., Zhang J., Huang K., Letaief K. B. A survey on mobile edge computing: The communication perspective, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, no. 99(1-1), pp. 37–51. doi:10.1109/COMST.2017.2745201
- Liu Y., Fieldsend J. E., Min G. A framework of fog computing: architecture, challenges, and optimization, *IEEE Access*, 2017, no. 5, pp. 25445–25454. doi:10.1109/ACCESS.2017.2766923
- Matrouk K., Alatoun K. Scheduling algorithms in fog computing: A survey, *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 2021, no. 9(1), pp. 59–74. doi:10.2991/ijndc.k.210111.001
- Rahm E., Do H. H. Data cleaning: Problems and current approaches, *IEEE Data Eng.*, 2000, no. 23.
- Huang C., Lu R., Choo K. Vehicular fog computing: architecture, use case, and security and forensic challenges, *IEEE Communications Magazine*, 2017, no. 55(11), pp. 105–111. doi:10.1109/MCOM.2017.1700322
- Multimedia Big Data Computing for IoT Applications: Concepts, Paradigms and Solutions*. Tanwar S., Tyagi S., Kumar N. (Eds.). 2019, vol. 163. 477 p. doi:10.1007/978-981-13-8759-3
- Gorlatova M., Inaltekin H., Chiang M. Characterizing task completion latencies in multi-point multi-quality fog computing systems, *Computer Networks*, 2020, no. 181(107526). doi:10.1016/j.comnet.2020.107526
- Aburukba R. O., Landolsi T., Omer D. A heuristic scheduling approach for fog-cloud computing environment with stationary IoT devices, *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, no. 180(102994). doi:10.1016/j.jnca.2021.102994
- Kimovski D., Math R. Cloud, fog or edge: Where to compute? *IEEE Internet Computing*, 2021, no. 25(4), pp. 30–36. doi:10.1109/MIC.2021.3050613
- Zhang C. Design and application of fog computing and Internet of Things service platform for smart city, *Future Generation Computer Systems*, 2020, no. 112, pp. 630–640. doi:10.1016/j.future.2020.06.016
- Etemadi M., Ghobaei-Arani M., Shahidinejad A. Resource provisioning for IoT services in the fog computing environment: An autonomic approach, *Computer Communications*, 2020, no. 161, pp. 109–131. doi:10.1016/j.comcom.2020.07.028
- Zahmatkesh H., Al-Turjman F. Fog computing for sustainable smart cities in the IoT era: Caching techniques and enabling technologies – an overview, *Sustainable Cities and Society*, 2020, no. 59(102139). doi:10.1016/j.scs.2020.102139
- Bellendorf J., Mann Z. A. Classification of optimization problems in fog computing, *Future Generation Computer Systems*, 2020, no. 107, pp. 158–176. doi:10.1016/j.future.2020.01.036
- Chen X., Zhou Y., Yang L., Lv L. Hybrid fog/cloud computing resource allocation: Joint consideration of limited communication resources and user credibility, *Computer Communications*, 2021, no. 169, pp. 48–58. doi:10.1016/j.comcom.2021.01.026
- Kaur M., Aron R. Energy-aware load balancing in fog cloud computing, *Materials today: Proceedings*, 2020, *Intern. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020*. Elsevier Ltd, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.121
- Wang F., Wang J., Yang W. Efficient incremental authentication for the updated data in fog computing, *Future Generation Computer Systems*, 2021, no. 114, pp. 130–137. doi:10.1016/j.future.2020.07.039
- Ogundoyin S. O., Kamil I. A. A Fuzzy-AHP based prioritization of trust criteria in fog computing services, *Applied Soft Computing*, 2020, no. 97(106789). doi:10.1016/j.asoc.2020.106789
- Osipov V. U. *Information Security: Synthesis of Control Programs*. Petrodvorets, VMIRE Publ., 2001. 64 p.
- Tianxing M., Osipov V., Vodyaho A., Lebedev S., Zhukova N. Distributed technical object model synthesis based on monitoring data, *International Journal of Knowledge and Systems Science*, 2019, no. 10, pp. 27–43. doi:10.4018/IJKSS.2019070103
- Karagiannis V., Schulte S. Distributed algorithms based on proximity for self-organizing fog computing systems, *Pervasive and Mobile Computing*, 2021, no. 71(101316). doi:10.1016/j.pmcj.2020.101316
- Dou W., Tang W., Liu B., Xu X., Ni Q. Blockchain-based mobility-aware offloading mechanism for fog computing services, *Computer Communications*, 2020, no. 164, pp. 261–273. doi:10.1016/j.comcom.2020.10.007
- Zeeshan A., Shehzad A. C., Khalid M., Sahil G., Zhihan L., Yousaf B. Z. A clogging resistant secure authentication scheme for fog computing services, *Computer Networks*, 2021, no. 185(107731). doi:10.1016/j.comnet.2020.107731
- Bhatia J., Modi Y., Tanwar S., Bhavsar M. Software defined vehicular networks: A comprehensive review, *International Journal of Communication Systems (IJCS)*, 2019, no. 32(12). doi:10.1002/dac.4005
- Dastjerdi A. V., Gupta H., Calheiros R. N., Ghosh S. K., Buyya R. Fog computing: Principles, architectures, and applications, *Cornell University*, 2016. doi:10.48550/arXiv.1601.02752
- Butyrsky E. U., Vodyakho A. I., Zhukova N. Z., Subbotin A. N. Cloud systems of intelligent video surveillance. Logical models and data collection model, *Information and Space*, 2022, no. 4, pp. 74–81 (In Russian). EDN: YEMPWW
- Butyrsky E. U., Vodyakho A. I., Zhukova N. Z., Subbotin A. N. Cloud systems and intelligent video surveillance. Software, *Information and Space*, 2023, no. 1, pp. 45–55 (In Russian). EDN: EXBSEI



## Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана

М. Е. Иванов<sup>а</sup>, ассистент, [orcid.org/0000-0002-7584-6946](https://orcid.org/0000-0002-7584-6946)

Ю. Ф. Матасов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0003-2435-8365](https://orcid.org/0009-0003-2435-8365), [yfmatasov@yandex.ru](mailto:yfmatasov@yandex.ru)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** стабилизация по высоте полета экраноплана является одной из самых актуальных задач управления указанным типом летательного аппарата. Актуальность заключается в трудности организации данного процесса с требуемым уровнем качества в связи с целеполаганием безопасности полета вблизи подстилающей поверхности. **Цель:** преобразовать систему стабилизации высоты полета экраноплана и разработать для нее нейросетевой регулятор, который позволит улучшить качество переходного процесса системы; провести моделирование исходной и модернизированной систем стабилизации. **Результаты:** проведено моделирование с использованием Matlab Simulink работы классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета. По результатам моделирования достигнуто улучшение качества переходного процесса системы за счет уменьшения его колебательности и времени окончания. Для этого в схему системы управления добавлен регулятор NARMA-L2, использующий один из методов искусственного интеллекта – искусственную нейронную сеть. Настройка регулятора произведена с помощью обучения данной сети методом Левенберга – Марквардта после задания необходимых параметров структуры нейронной сети и формирования обучающей выборки. **Практическая значимость:** оптимальная настройка нейросетевого регулятора позволяет значительно улучшить качество переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана, особенно в том, что касается длительного времени достижения установившегося режима работы.

**Ключевые слова** – система стабилизации, методы искусственного интеллекта, нейросетевой регулятор, метод Левенберга – Марквардта, переходный процесс.

**Для цитирования:** Иванов М. Е., Матасов Ю. Ф. Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 27–34. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

**For citation:** Ivanov M. E., Matasov Yu. F. Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 27–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

### Введение

Стабилизация высоты полета экраноплана является сложной технической задачей, сопряженной со значительным количеством трудностей, связанных с близостью подстилающей поверхности под корпусом судна [1–5]. Вследствие этого измерение высоты полета должно обеспечиваться с максимальной точностью при максимизации целевой функции безопасности полета. Видным современным ученым, занимающимся проблемами управления низколетящими аппаратами типа экраноплан, является Небылов Александр Владимирович; основные проблемы стабилизации и повышения точности измерения параметров полета описаны в его научных трудах [6–8]. Существенно повышает качество упомянутых систем применение перспективного математического аппарата – методов искусственного интеллекта [9–11], с помощью которых формируются передаточные функции регуляторов, обеспечивающих требуемое качество переход-

ного процесса. Так, в работах [12–14] представлен порядок формирования типовых нечетких регуляторов, основанных на нечеткой логике. Принципы синтеза нейросетевых регуляторов, использующих искусственные нейронные сети (ИНС), изложены в научных статьях [15, 16].

Ранее автором был рассмотрен алгоритм настройки нечеткого регулятора для улучшения качества переходного процесса в системе стабилизации угла тангажа низколетящего аппарата [17]. В текущем же исследовании для решения аналогичной задачи в системе стабилизации высоты полета применен нейросетевой регулятор, настройка которого, как и предыдущего, была произведена в среде программного комплекса Matlab Simulink. Таким образом, постановка исследовательской задачи имеет следующий вид: требуется осуществить настройку оптимального нейросетевого регулятора по критерию максимизации качества переходного процесса системы стабилизации высоты экраноплана с целью улучшить совокупный показатель управляемости рассматриваемого объекта.

### Краткие теоретические сведения

Под стабилизацией понимается вычисление разницы между заданным (требуемым) значением измеряемого летного параметра (в данном случае высоты) и фактически измеренным значением на выходе системы, передаваемым по обратной связи к началу системы для расчета разницы. Система управления по высоте  $h$  формируется исходя из сигналов измерения высоты: в настоящем исследовании измерение  $h$  и  $\dot{h}$  осуществляется набором из нескольких локационных высотомеров и акселерометров вертикальной оси чувствительности, а также одним доплеровским измерителем вертикальной скорости [18]. В системе стабилизации используются сигналы с коэффициентами: а) сигнал высоты с  $K_h$ ; б) сигнал вертикальной скорости с  $K_{\dot{h}}$ ; в) сигнал угла тангажа с  $K_\theta$ ; г) сигнал угловой скорости тангажа с  $K_{\dot{\theta}}$ . Последние два сигнала необходимы в контурах обратной связи для компенсации движения центра масс и угловых движений соответственно.

Математическая модель отклонения рулей высоты на угол  $\delta_B$ , представляющая собой закон управления системы автоматической стабилизации по высоте полета экраноплана, выглядит следующим образом [19]:

$$\delta_B = (K_h + K_{\dot{h}} \cdot p) \cdot h + (K_\theta + K_{\dot{\theta}} \cdot p) \cdot \theta - K_h \cdot h_3, \quad (1)$$

где  $h_3$  — заданное на входе (требуемое) значение текущей высоты полета  $h$ .

В предположении о малой скорости движения центра масс, позволяющей пренебречь динамическими погрешностями элементов системы, закон (1) можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta(p) \cdot \theta = (b_0 \cdot p + a_4) p \cdot h_3 + F_1; \\ \Delta(p) \cdot h = a_4 \cdot h_3 + F_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta(p) = p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p$ ;  $b_0 = n_B \cdot K_h$ ,  $a_4 = n_B \cdot n_{22} \cdot K_h$  — системные коэффициенты  $n_B$  и  $n_{22}$ , вычисляемые по Боднеру;  $F_1$  и  $F_2$  — внешние возмущения, действующие на систему.

Выражение для расчета передаточной функции всей системы стабилизации по управляющему сигналу имеет вид

$$W(p) = \frac{a_4}{p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p}, \quad (3)$$

где  $a_1 = c_1 + n_B \cdot K_{\dot{\theta}}$ ;  $a_2 = c_2 + n_B \cdot (K_\theta + n_{22} \cdot K_{\dot{\theta}})$ ;  $a_3 = n_B \cdot n_{22} \cdot (K_\theta + K_{\dot{h}})$ ;  $c_1$  и  $c_2$  — системные боднеровские коэффициенты.

Система уравнений для расчета коэффициентов усиления системы выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} K_h = \frac{\omega^4}{n_B \cdot n_{22}}; \\ K_\theta = \frac{1}{n_B} (A_2 \cdot \omega^2 - c_2 + c_1 \cdot n_{22} - A_1 \cdot \omega \cdot n_{22}); \\ K_{\dot{h}} = \frac{1}{n_B \cdot n_{22}} \cdot [A_3 \cdot \omega^3 - A_2 \cdot \omega^2 \cdot n_{22} + \\ + A_1 \cdot \omega \cdot n_{22}^2 + n_{22} \cdot (c_2 - c_1 \cdot n_{22})]; \\ K_{\dot{\theta}} = \frac{1}{n_B} \cdot (A_1 \cdot \omega - c_1), \end{cases} \quad (4)$$

где  $a_1 = A_1 \cdot \omega$ ;  $a_2 = A_2 \cdot \omega^2$ ;  $a_3 = A_3 \cdot \omega^3$ ,  $A_i$  и  $\omega$  — некоторые заданные величины.

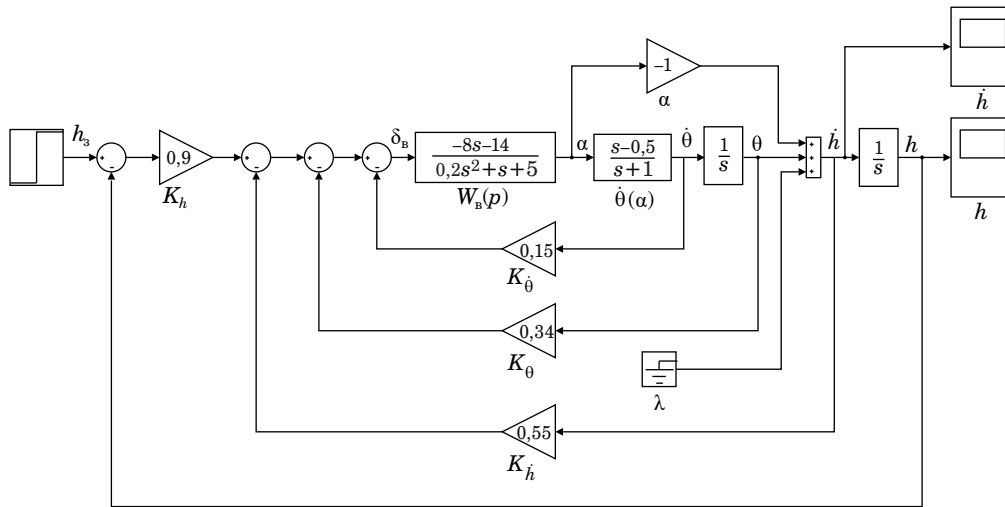
### Классическая и модернизированная нейросетевым регулятором системы стабилизации высоты полета

Структурная Simulink-схема системы стабилизации по высоте (рис. 1) составлена на основе описанной выше математической модели.

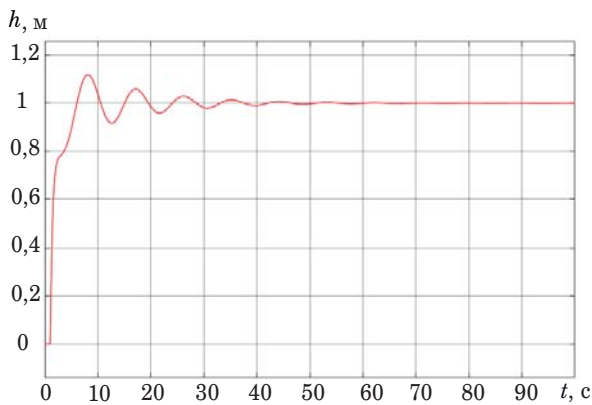
В качестве объекта управления рассмотрен экраноплан тяжелого класса с параметрами [20]: масса — 700–800 т, размах крыла — 40 м при средней (крейсерской) высоте полета 6 м и минимально допустимой высоте полета 4 м, максимальная высота действия экранного эффекта — 40 м, аэродинамическая схема аппарата — «составное крыло». Линеаризация системы была произведена по принципу, аналогичному рассмотренному в статье [17]. В представленной схеме отражено возмущающее воздействие на систему, связанное с углом атаки  $\alpha$ . Влияние внешней помехи  $\lambda$  не учитывается: в данном случае модель помехи — нулевой сигнал (Ground). На выходе системы имеется измеренное (фактическое) значение высоты  $h$ , дающее системное рассогласование  $\Delta h = h_3 - h$ . Следует заметить, что линеаризованные коэффициенты передаточной функции экраноплана как объекта управления отражают случай, когда отсчет изменения высоты  $\Delta h$  производится с  $h_{cp} = 6$  м — крейсерской высоты полета, что соответствует работе системы стабилизации в неводоизмещающем режиме движения судна (в пределах действия экранного эффекта).

Переходный процесс системы стабилизации высоты представлен на рис. 2. Зависимость наглядно показывает всю трудность процесса стабилизации данного типа летательного аппарата по высоте полета: общее время переходного процесса составило  $t_{\text{п}} \approx 80$  с с учетом характера его затухающих колебаний, значение статической ошибки пренебрежимо мало ( $\Delta h \approx 0,04$  %).

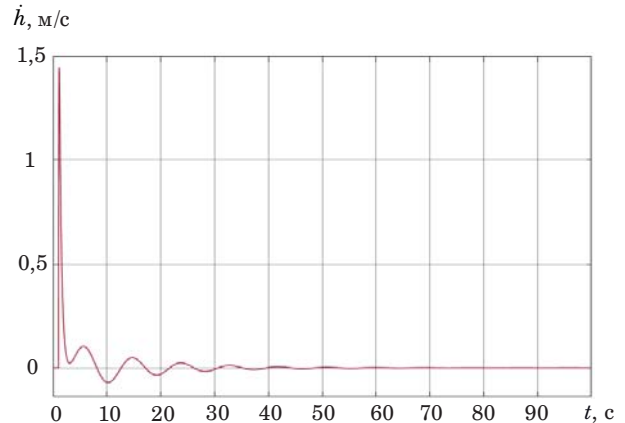
Несмотря на то, что система стабилизации по высоте  $h$  устойчива, очевидно [21], что качество



■ **Рис. 1.** Схема системы автоматической стабилизации высоты полета  
 ■ **Fig. 1.** Scheme of the automatic altitude stabilization system



■ **Рис. 2.** Переходный процесс системы стабилизации высоты полета экраноплана  
 ■ **Fig. 2.** The transient of the WIG-craft altitude stabilization system



■ **Рис. 3.** Процесс установления в нуле вертикальной скорости изменения высоты полета  
 ■ **Fig. 3.** The process of setting the vertical speed of altitude change to zero

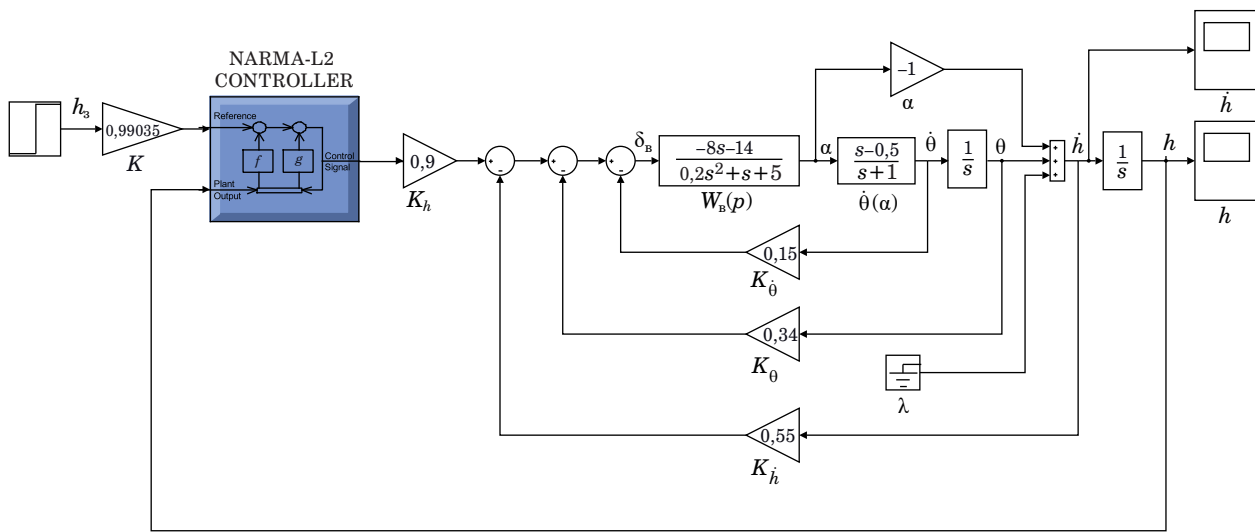
переходного процесса не удовлетворяет требованиям по быстродействию, предъявляемым к системам управления по каналам основных параметров полета экраноплана. В частности, столь длительное время стабилизации и колебательность данного процесса недопустимы в условиях полета вблизи подстилающей поверхности в пределах действия экранного эффекта.

Также неудовлетворительно качество работы системы по каналу вертикальной скорости изменения высоты  $\dot{h}$ : ее сведение к нулю достигается за недопустимо большой интервал времени, при этом на отметке времени  $t = 2$  с имеется значительный выброс  $\dot{h} \approx 1,45$  м/с (рис. 3).

Предлагается улучшить процесс стабилизации высоты полета экраноплана при помощи

ее интеллектуализации с нейросетевым регулятором NARMA-L2 Controller (Nonlinear Auto-Regressive Moving Average), использующим авторегрессионную модель объекта управления со скользящим средним [22]. Данный тип регулятора был выбран по причине наименьших затрат вычислительных ресурсов по сравнению с нейросетевым регулятором, использующим эталонную модель объекта (Model Reference Controller), и предиктивным (предсказательным, NN Predictive Controller).

Вид модернизированной нейросетевым регулятором интеллектуальной системы стабилизации показан на рис. 4. Следует заметить, что совместно с регулятором используется усилительное устройство с коэффициентом  $K = 0,99035$  для конечной компенсации статической ошибки



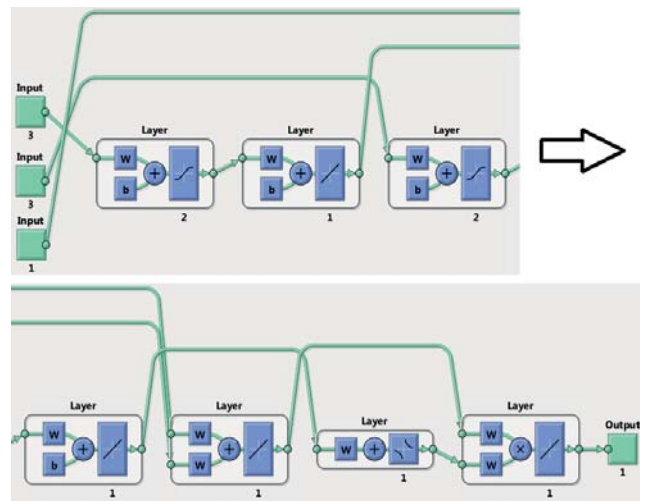
■ **Рис. 4.** Схема системы стабилизации высоты полета экраноплана с нейросетевым регулятором  
 ■ **Fig. 4.** Scheme of the altitude stabilization system with the neurocontroller

регулирования, возникающей при использованной модели ИНС. Корректировка остальных элементов системы при этом не требуется.

**Параметрический синтез нейросетевого регулятора**

Применительно к нейросетевым регуляторам в системе автоматического управления (САУ) используется ИНС прямого распространения, содержащая семь слоев: функция активации входного слоя – гиперболический тангенс, последнего слоя – линейная. Классический метод обучения – по Левенбергу – Марквардту (обратное распространение ошибки). Один из вариантов такой сети для случая трех входных и одного выходного нейронов, а также четырех нейронов скрытого слоя представлен на рис. 5. Требуемое качество переходного процесса САУ, в которой используется нейросетевой регулятор, достигается оптимальной конфигурацией встраиваемой в него ИНС и ее обучением методом Левенберга – Марквардта. Настройка осуществляется заданием числовых значений в окне настройки нейросетевого регулятора (рис. 6).

Также перед обучением ИНС регулятора необходимо сформировать обучающую выборку значений входного сигнала: в большинстве случаев обучающая выборка генерируется случайным образом по причине априорной неопределенности, а следствием стохастичности данного процесса является изменение поведения всей САУ при задании другой обучающей выборки. С другой стороны, нейросетевой регулятор обладает важным свойством адаптивности, что



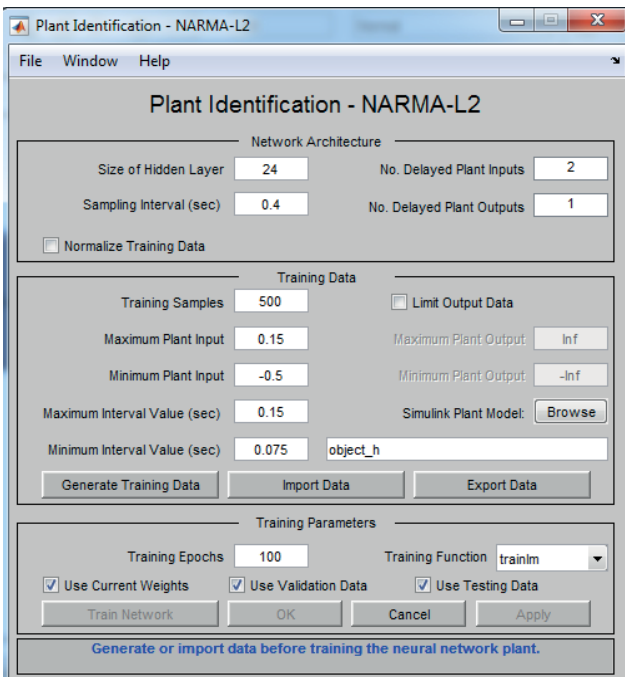
■ **Рис. 5.** Имитационная модель искусственной нейронной сети в нейросетевом регуляторе системы управления  
 ■ **Fig. 5.** Simulation model of the artificial neural network in neurocontroller of the control system

исключает необходимость вручную перенастраивать регулятор при изменении входных данных САУ.

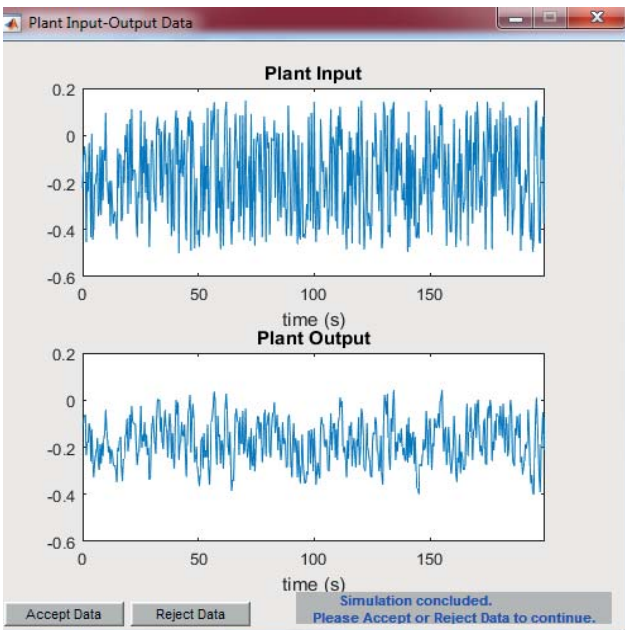
Представленные в окне настройки регулятора параметры формируют целевое качество переходного процесса всей системы стабилизации:

- Size of Hidden Layer (количество нейронов скрытого слоя);
- Sampling Interval (интервал времени сбора данных из модели объекта, с);
- No. Delayed Plant Inputs (число элементов запаздывания на входе модели объекта);





■ **Рис. 6.** Окно настройки нейросетевого регулятора  
 ■ **Fig. 6.** The window with settings of neurocontroller



■ **Рис. 7.** Обучающая выборка для нейронной сети регулятора  
 ■ **Fig. 7.** Training data for the neural network in controller

- No. Delayed Plant Outputs (число элементов запаздывания на выходе модели объекта);
- Normalize Training Data (приведение обучающей выборки к нормированному диапазону значений [0; 1]);

- Training Samples (количество обучающих примеров в выборке для обучения, тестирования и контроля нейронной сети);
- Minimum Plant Input (минимально допустимое значение входного сигнала объекта);
- Maximum Plant Input (максимально допустимое значение входного сигнала объекта);
- Minimum Plant Output (минимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Maximum Plant Output (максимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Minimum Interval Value (минимальный интервал входного сигнала объекта, с);
- Maximum Interval Value (максимальный интервал входного сигнала объекта, с);
- Training epochs (максимально допустимое число итераций обучения);
- Training Function (обучающая функция, задана как trainlm по умолчанию).

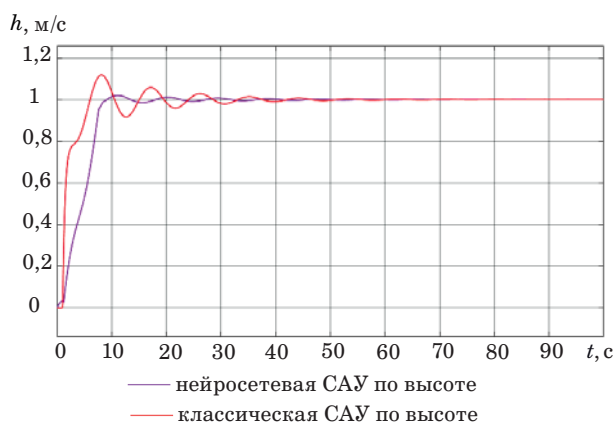
В качестве объекта управления (Simulink Plant Model) использована схема оригинальной системы стабилизации (см. рис. 1), сохраненная в отдельный файл “object\_h”; данный шаг необходим для реализации свойства адаптивности регулятора. Обучающая выборка, сгенерированная для нейронной сети посредством Generate Training Data, представлена на рис. 7. Характер изменения выходного (Output) сигнала относительно входного (Input) объекта управления говорит о правильности формирования выборки. После обучения нейронной сети регулятор настроен и готов к использованию.

### Сравнительный анализ классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета экраноплана

Полученные результаты позволяют провести дальнейший сравнительный анализ рассмотренных систем. Для этого необходимо осуществить параллельное соединение классической (см. рис. 1) и нейросетевой (см. рис. 4) систем стабилизации высоты экраноплана. Как отмечалось ранее, преобразующее звено  $K = 0,99035$  используется совместно с нейросетевым регулятором для компенсации статической ошибки конечного переходного процесса нейросетевой системы стабилизации. Структурные Simulink-схемы самой системы, определенной на рис. 1, отнесены в отдельные блоки типа Subsystem для упрощения представления параллельно соединенных систем.

Переходные процессы двух систем стабилизации представлены на одной координатной плоскости (рис. 8).

После преобразования схемы параллельного соединения классической и нейросетевой систем



■ **Рис. 8.** Переходные процессы классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета экраноплана

■ **Fig. 8.** Transients of classic and neuro WIG-craft altitude stabilization systems



■ **Рис. 9.** Процессы стабилизации вертикальной скорости изменения высоты

■ **Fig. 9.** The processes of the vertical speed of altitude change stabilization

были также получены процессы стабилизации обеих систем по каналу вертикальной скорости  $\dot{h}$  (рис. 9).

## Заключение

По результатам исследования можно сделать качественное заключение о целесообразности применения нейросетевого регулятора для стабилизации по высоте полета экраноплана. Нейросетевая интеллектуализация позволила уменьшить время переходного процесса на 31 % ( $t_{\text{classic}} \approx 80$  с,  $t_{\text{neuro}} \approx 55$  с), а также снизить его колебательность. Кроме того, увеличилась плавность

процесса стабилизации вертикальной скорости изменения высоты полета при незначительном увеличении флуктуационных составляющих. Данный фактор можно объяснить тем, что генерация обучающей выборки для нейронной сети регулятора осуществляется случайным образом, т. е. обучающая выборка является стохастическим процессом. Поэтому при формировании другой обучающей выборки характер конечного переходного процесса может измениться, с другой стороны, свойство адаптивности нейросетевого регулятора позволяет ему учитывать изменение входных данных без потери устойчивости всей системы стабилизации.

## Литература

1. Княжский А. Ю. Разработка и исследование алгоритма управления движением низколетящего аппарата над неровной поверхностью, минимизирующего его среднюю высоту: дис. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича, 2018. 135 с.
2. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Минимизация абсолютной высоты низколетящего аппарата за счет вертикального огибания длиннопериодических морских волн. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2020, т. 63, № 1, с. 84–93. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-1-84-93
3. Куликов В. Е., Морозов П. А. Анализ точности стабилизации геометрической высоты маловысотного полета летательного аппарата над рельефом местности. *Навигация и управление летательными аппаратами*, 2022, № 2(37), с. 70–84. EDN: VXWHMC
4. Бондарев В. Г., Лопаткин Д. В., Шобонов М. С. Разработка алгоритмического обеспечения системы стабилизации высоты беспилотного летательного аппарата. *Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXI Междунар. науч.-метод. конф.*, Воронеж, 2021, с. 205–210. EDN: YBANKB
5. Бронников А. М., Каравашкина Е. О., Кулабухов В. С., Чекин А. Ю. Синтез управления в продольном канале маловысотного контура беспилотного вертолета. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2015, № 213(3), с. 5–12. EDN: TONRSN
6. Небылов А. В., Небылов В. А., Панферов А. И. Концепция морской горизонтальной посадки крылевого космического аппарата путем стыковки с экранопланом. *Инновационное приборостроение*, 2022, т. 1, № 1, с. 65–81. EDN: HNMEME
7. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Анализ точности измерения высоты низколетяще-

- го аппарата в условиях морского волнения. *Авиакосмическое приборостроение*, 2018, № 10, с. 3–10. EDN: YMHLSP
8. **Nebylov A. V., Nebylov V. A.** WIG-craft flight control concept for the waved sea. *EUCASS 2017: Electronic Resource*, Milan, Italy, 03–06 June 2017, 2017. EDN: ZMKWJB. <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-202.pdf> (дата обращения: 30.09.2024).
  9. **Королев А. П.** Генетический алгоритм для автоматической настройки ПИД-регулятора. *Молодой ученый*, 2023, № 17(464), с. 1–7. EDN: PVJAMF
  10. **Mewada S.** Perspectives of fuzzy logic and their applications. *International Journal of Data Analytics (IJDA)*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 99–145. doi:10.4018/IJDA.2021010105
  11. **Иванов М. Е.** Применение искусственной нейронной сети для распознавания радиосигналов приемниками летательного аппарата. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2023, т. 21, № 4, с. 19–24. EDN: DWTDEA
  12. **Богачев И. С., Коломыцев И. С.** Методика настройки нечеткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab. *Современные наукоемкие технологии*, 2020, № 11–1, с. 9–14. doi:10.17513/snt.38330, EDN: VGDEWH
  13. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Синтез нечетких логических регуляторов. *Информационно-управляющие системы*, 2011, № 1, с. 22–27.
  14. **Андривская Н. В., Билоус О. А., Семенов С. В.** Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде MATLAB. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2012, № 6, с. 282–287. EDN: PWNZBX
  15. **Шилонос А. В., Молдован Д. В.** Динамическая коррекция управляющих воздействий системы управления сложного технического объекта с использованием нейросетевых технологий. *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*, 2021, № 4 (4), с. 415–422. EDN: SYZWSB
  16. **Величко Е. П., Соколыч П. Ю.** Применение нейросетевого регулятора в системах позиционного регулирования. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*, 2015, № 2, с. 7–20. EDN: TVSBZZ
  17. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Применение нечеткого регулятора для устранения флуктуаций переходного процесса возмущенной системы автоматического управления углом тангажа летательного аппарата. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO
  18. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Метод оптимизации параметров измерителя путевой скорости низколетящего летательного аппарата на основе применения теории оптимальной фильтрации. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2023, т. 22, № 4, с. 78–85. doi:10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85, EDN: ANJPFJ
  19. **Кравченко П. П., Куликов Л. И., Щербинин В. В.** Применение метода оптимизированных дельта-преобразований в задаче управления посадкой беспилотного летательного аппарата. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2019, № 5, с. 130–144. doi:10.1134/S0002338819050093, EDN: XCPHAZ
  20. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Применение методов искусственного интеллекта в системе управления воздушным движением тяжелого многоцелевого экраноплана. *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы XXIV Междунар. науч. конф.: в 3 ч., Санкт-Петербург, 31 мая–04 июня 2021 г. СПб., СПбГУАП, 2021, ч. 2, с. 323–330. EDN: GXGBAX*
  21. **Вшивков Ю. Ф., Галушко Е. А., Кривель С. М.** Синтез эффективной автоматической системы управления экранопланов. *Решетневские чтения*, 2013, т. 1, № 17, с. 8–9. EDN: SJCHGH
  22. **Al-Falooji N. S., Abbod M.** Helicopter control using fuzzy logic and Narma-L2 techniques. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1–14. doi:10.5815/ijisa.2020.05.01, EDN: VNDRBI

UDC 62-503.55

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34

EDN: BOBWBN

**Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system**M. E. Ivanov<sup>a</sup>, Assistant Professor, [orcid.org/0000-0002-7584-6946](https://orcid.org/0000-0002-7584-6946)Yu. F. Matasov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0009-0003-2435-8365](https://orcid.org/0009-0003-2435-8365), [yfmatasov@yandex.ru](mailto:yfmatasov@yandex.ru)<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The stabilization of the flight altitude of WIG-craft is one of the most relevant problems of controlling this type of aircraft. The relevance consists in the difficulty of organizing this process with the required level of quality due to the goal setting of flight safety near the underflying surface. **Purpose:** To transform the WIG-craft altitude stabilization system and develop the neuro-controller

for it, which will improve the quality of the system's transient process; to conduct the simulation of the original and upgraded stabilization systems. **Results:** Using Matlab Simulink we carry out the simulation of the work of classic and neural flight altitude stabilization systems. As a result of the simulation we improve the quality of the transient process of the system by reducing its variability and ending. To do this, we add the NARMA-L2 Controller to the control system using one of the methods of artificial intelligence – an artificial neural network. The controller is set up using the Levenberg – Marquardt method of training this network after setting the necessary parameters of the neural network structure and forming a training data. **Practical relevance:** The optimal setting of the neuro-controller makes it possible to improve the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system, with a long time required to achieve a steady state of operation being its typical feature.

**Keywords** – stabilization system, artificial intelligence methods, neuro-controller, the Levenberg – Marquardt method, transient process.

**For citation:** Ivanov M. E., Matasov Yu. F. Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 27–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

## References

1. Knyazhskij A. Yu. *Razrabotka i issledovanie algoritma upravleniya dvizheniem nizkoletyashhego apparata nad nerovnoj poverkhnost'yu, minimiziruyushhego ego srednyuyu vysotu*. Dis. kand. tech. nauk [Development and research of an algorithm for controlling the movement of a low-flying vehicle over an uneven surface, minimizing its average height. cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPbGUT im. prof. Bonch-Bruевичa Publ., 2018. 135 p. (In Russian).
2. Knyazhskiy A. Yu., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Minimizing the absolute height of a lowflying vehicle due to vertical tracking of long-period sea waves. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 84–93 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2020-63-1-84-93
3. Kulikov V. E., Morozov P. A. Analysis of geometric low-level flight altitude stabilization during flight over terrain. *Aircraft Navigation and Control*, 2022, no. 2(37), pp. 70–84 (In Russian). EDN: VXWHMC
4. Bondarev V. G., Lopatkin D. V., Shobonov M. S. Development of algorithmic support for the altitude stabilization system the unmanned aircraft. *Materialy XXI Mezhduнародной nauchno-metodicheskoy konferencii "Informatika: problemy, metody, tekhnologii"* [Proc. of the XXI Intern. Scientific and Methodological Conf. "Computer science: problems, methods, technologies"]. Voronezh, 2021, pp. 205–210 (In Russian). EDN: YBANKB
5. Bronnikov A. M., Karavashkina E. O., Kulabukhov V. S., Chekin A. Yu. Design of the low-level control system in longitudinal channel of an unmanned helicopter. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 213(3), pp. 5–12 (In Russian). EDN: TONRSN
6. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I. The concept of winged space vehicle marine horizontal landing by docking with ekranoplane. *Innovative Instrumentation*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 65–81 (In Russian). EDN: HHMEME
7. Knyazhsky A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Analysis of the accuracy of a system for measuring the altitude of a low-altitude vehicle near sea waves. *Aerospace Instrumentation*, 2018, no. 10, pp. 3–10 (In Russian). EDN: YMHLSLSP
8. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-craft flight control concept for the waved sea. *EUCASS 2017: Electronic Resource*, Milan, Italy, June 03–06 2017, 2017. EDN: ZMKWJB. Available at: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-202.pdf> (accessed 30 September 2024).
9. Korolev A. P. Genetic algorithm for automatic PID controller tuning. *Young Scientist*, 2023, no. 17(464), pp. 1–7. EDN: PVJAMF
10. Mewada S. Perspectives of fuzzy logic and their applications. *International Journal of Data Analytics (IJDA)*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 99–145. doi:10.4018/IJDA.2021010105
11. Ivanov M. E. Application of an artificial neural network for recognition of radio signals by aircraft receivers. *Information-Measuring and Control Systems*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 19–24 (In Russian). doi:10.18127/j20700814-202304-03, EDN: DWTDEA
12. Bogachev I. S., Kolomytsev V. G. Technique for adjusting a fuzzy regulator with a nonlinear P-type characteristic by Matlab. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2020, no. 11-1, pp. 9–14. doi:10.17513/snt.38330, EDN: VGDEWH
13. Burakov M. V., Konovalov A. S. Fuzzy controllers design. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1, pp. 22–27 (In Russian).
14. Andrievskaya N. V., Bilous O. A., Semenov S. V. *Metodika proektirovaniya nechetkogo regulyatora na baze PI-regulyatora v srede MATLAB*. In: *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [The methodology of designing a fuzzy controller based on a PI-controller in the Matlab environment. In: Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electro-technics, Informational Technologies, Control Systems], 2012, no. 6, pp. 282–287 (In Russian). EDN: PWNZBX
15. Shilonosov A. V., Moldovan D. V. Dynamic correction of control actions of the control system of a complex technical object using neural network technologies. *Al'manah Permskogo voennogo instituta vojsk nacional'noj gvardii* [Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard], 2021, no. 4, pp. 415–422 (In Russian). EDN: SYZWBS
16. Velichko E. P., Sokolchik P. Yu. Neural network controllers in the system position control. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology], 2015, no. 2, pp. 7–20 (In Russian). EDN: TVSBZZ
17. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 51–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO
18. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Optimization of the parameters of a ground speed meter of low-flying aircraft based on the application of the theory of optimal filtration. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2023, vol. 22, no. 4, pp. 78–85 (In Russian). doi:10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85, EDN: ANJPFJ
19. Kravchenko P. P., Kulikov L. I., Scherbinin V. V. Application of the method of optimized delta-transformations in the control landing problem for an unmanned aerial vehicle. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 786–800. doi:10.1134/S1064230719050095, EDN: VAOHXJ
20. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Application of artificial intelligence methods in the air traffic control system of a heavy multipurpose WIG-craft. *Materialy XXIV Mezhduнародной nauchnoj konferencii "Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy"* [Proc. of the XXIV Intern. Scientific Conf. "Wave electronics and infocommunication systems"]. Saint-Petersburg, 2021, part 2, pp. 323–330. EDN: GXGBAX
21. Vshivkov J. F., Galushko E. A., Krivel S. M. Synthesis of efficient automatic WIG control system. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2013, vol. 1, no. 17, pp. 8–9 (In Russian). EDN: SJCHGH
22. Al-Falooji N. S., Abbod M. Helicopter control using fuzzy logic and Narma-L2 techniques. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1–14. doi:10.5815/ijisa.2020.05.01, EDN: VNDRBI



## Интеллектуальное нейроуправление новостными потоками с непрерывным обучением

**В. Ю. Осипов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-5905-4415](https://orcid.org/0000-0001-5905-4415), [osipov\\_vasily@mail.ru](mailto:osipov_vasily@mail.ru)

**С. В. Кулешов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор РАН, [orcid.org/0000-0002-8454-5598](https://orcid.org/0000-0002-8454-5598)

**А. А. Зайцева<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-1345-8550](https://orcid.org/0000-0002-1345-8550)

**Д. И. Милосердов<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-5312-5531](https://orcid.org/0000-0002-5312-5531)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** нейросетевое управление (нейроуправление) различными нелинейными объектами представляет большой теоретический и практический интерес. Однако степень интеллектуальности и функциональности известных решений по такому управлению во многом не удовлетворяет потребностям практики. **Цель:** разработать метод и систему нейроуправления с расширенной интеллектуальностью и функциональностью. **Методы:** для достижения цели предлагаются новые нейросетевые решения, ориентированные на обработку новостных потоков с изменяющимися законами поведения и выработку управляющих решений в этих условиях. **Результаты:** предложена архитектура интеллектуальной нейросетевой системы с непрерывным обучением, способной решать существенно расширенный набор творческих задач без ее перестройки. В частности, это задачи нейросетевого распознавания, прогнозирования, восстановления событий, их синтеза, управления новостными потоками и другими объектами. Разработан новый метод многоуровневой нейросетевой обработки информации в рекуррентных нейронных сетях с управляемыми элементами. Предложены новые алгоритмы управления нейронными сетями, позволяющие интеллектуально решать задачи нейроуправления новостными потоками с непрерывным обучением. Сравнительный анализ полученных результатов с известными моделями и методами показал эффективность предложенных подходов. **Практическая значимость:** предложенная архитектура позволяет решать многие творческие задачи с непрерывным обучением без ее перестройки. Разработанный метод дает возможность реализовать управляемую многоуровневую нейросетевую обработку на основе новых ассоциативных принципов. Сформулированные новые рекомендации по построению перспективных систем нейроуправления позволяют ускорить их разработку и использование на практике. **Обсуждение:** даны рекомендации по созданию перспективных систем нейроуправления новостными потоками с непрерывным обучением. В качестве направлений дальнейших исследований по созданию перспективных интеллектуальных систем нейроуправления следует выделить наделение их искусственным мышлением, поиск решений по снижению сложности реализации, а также методов энергоэффективной и малогабаритной реализации.

**Ключевые слова** – нейросетевое управление, интеллектуальность, непрерывное обучение, обработка новостных потоков.

**Для цитирования:** Осипов В. Ю., Кулешов С. В., Зайцева А. А., Милосердов Д. И. Интеллектуальное нейроуправление новостными потоками с непрерывным обучением. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 35–45. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-35-45, EDN: IDATPB

**For citation:** Osipov V. Y., Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Miloserdov D. I. Intelligent neurocontrol of news streams with continuous learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 35–45 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-35-45, EDN: IDATPB

### Введение

Нейроуправление позволяет быстро формировать нейросетевые модели сложных нелинейных объектов даже при изменении законов их поведения и вырабатывать соответствующие управляющие воздействия. Не требуется трудоемкой разработки и перестройки сложных нелинейных аналитических зависимостей. В качестве объектов нейроуправления могут быть физические, химические, биологические, электронные, информационные и другие объекты. В частном случае возможно нейроуправление новостными потоками. Оно может предусматривать прогнозирование информационных событий и поиск целесообразных источ-

ников информации, селекцию интересующей информации по различным признакам. Также осуществимо противодействие возможным информационным угрозам не только через их блокирование, но и путем синтеза специальных воздействий как на источники этих угроз, так и на потребителей. Реализация нейроуправления предусматривает наличие соответствующих моделей и методов. Известен ряд традиционных подходов к управлению, в частности нейроуправлению [1–4]. Широкое применение получили трансформеры, способные с известной точностью решать различные творческие задачи, в том числе связанные с обработкой естественного языка [5]. Развиваются как архитектуры моделей, так и программное обеспечение,

упрощающее настройку и использование GPT (Generative Pretrained Transformer) [6].

Однако существующие подходы во многом не удовлетворяют современным потребностям практики, в том числе применительно к интеллектуальному управлению новостными потоками. Дальнейшее расширение интеллектуальности управления ими на основе традиционных нейросетевых решений существенно ограничено. Это касается, прежде всего, задач нейросетевой обработки потоков событий с изменяющимися законами поведения и выработки адекватных управляющих решений в этих условиях. Например, сети GPT требуют предварительного обучения, которое существенно влияет на результаты. Кроме того, результаты генеративных моделей, как правило, непредсказуемы и с трудом воспроизводимы [7]. Несовершенны применяемые архитектуры нейросетевых систем, алгоритмы их работы [8]. Возможности хранения сигналов на элементах искусственных рекуррентных нейронных сетей (РНС) и обеспечения устойчивости этих сетей при непрерывном обучении уступают характеристикам, присущим биологическим системам [9, 10]. Во многом не проработаны вопросы интеллектуальной многозадачной и многоуровневой обработки информации [11–14]. Это затрудняет переход от уровня элементарной обработки сигналов к уровню оперирования понятиями и наоборот. Остаются нерешенными проблемы нейросетевого формирования сознательных воздействий на объекты

управления. Требуют дальнейшего развития методы нейросетевой обработки информации различных масштабов в настоящем, прошлом и будущем времени [15–17].

Целью данного исследования является разработка метода и системы нейроуправления с расширенной интеллектуальностью и функциональностью применительно к новостным потокам. Для достижения этой цели предлагаются:

- новая архитектура интеллектуальной нейросетевой системы с непрерывным обучением, способной решать существенно расширенный набор творческих задач по обработке и управлению новостными потоками и другими объектами без ее перестройки;
- алгоритмы управления нейронными сетями, позволяющие интеллектуально решать задачи нейроуправления новостными потоками;
- рекомендации по построению перспективных систем нейроуправления.

### Архитектура интеллектуальной системы нейроуправления

Для расширения интеллектуальности и функциональности нейросетевых систем обработки и управления новостными потоками и другими объектами предлагается структурное решение, представленное на рис. 1. В его основу положено интеллектуальное ядро [18], состоящее из двух идентичных потоковых РНС (*РНС 1* и *РНС 2*)



■ **Рис. 1.** Структура системы нейроуправления новостными потоками  
 ■ **Fig. 1.** Structure of the news flow neural control system

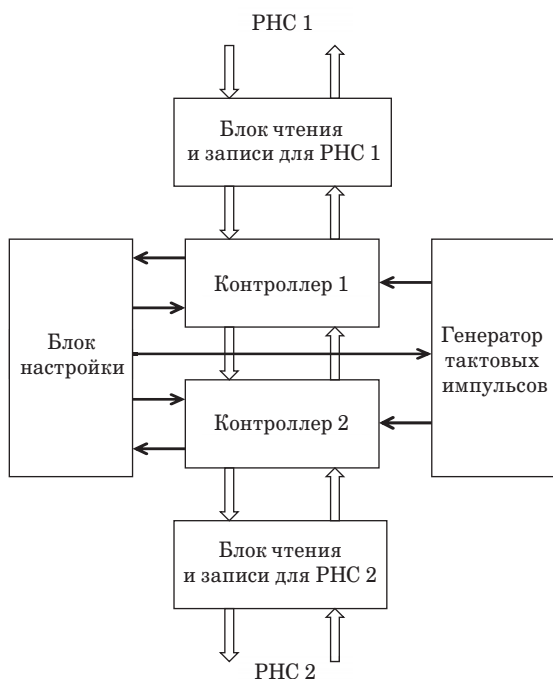
с новым блоком управления (рис. 2). Этот блок состоит из двух связанных симметричных подсистем управления РНС 1 и РНС 2. В его состав входит общий тактовый генератор, который вырабатывает импульсы для обработки сигналов в реальном и ускоренном времени.

Каждый контроллер может брать на себя функции как управления обучением нейронной сети, так и решения задач управления. Решение об изменении режимов работы может формироваться в блоке настроек. Информация в интеллектуальное ядро может поступать от различных датчиков. Согласно рис. 1 новостные потоки и управляющие воздействия перед поступлением в РНС 1, 2 представляются в блоке кодирования в виде последовательностей совокупностей единичных импульсов (СЕИ), несущих в себе всю информацию об исходных сигналах. Существует несколько вариантов обработки информации интеллектуальным ядром нейронной сети. Согласно первому варианту каждая РНС реализована как многоуровневая структура и работает в режиме многозадачности с непрерывным обучением. В этом варианте блок управления РНС координирует их работу.

Вся интеллектуальная обработка сигналов в этом случае выполняется в РНС на втором и более высоких уровнях. Предусмотрена как восходящая, так и нисходящая многоуровневая обработка. Наличие нескольких уровней позволяет разделить обработку сигналов прошлого и будущего

от реального времени. Во втором и третьем вариантах могут использоваться РНС как с одноуровневой, так и с многоуровневой структурой. В этих вариантах, как и в работе [18], одна из РНС непрерывно обучается, а вторая нейронная сеть используется для решения творческих задач по командам с блока управления сетью. Поясним один из таких вариантов, когда РНС 1 непрерывно обучается, воспринимая совокупности единичных импульсов, несущие информацию о новостных потоках и текущих управляющих воздействиях.

При поступлении СЕИ в РНС 1 они продвигаются вдоль слоев за счет реализованных пространственных сдвигов сигналов, связываются друг с другом и с ранее запомненной информацией на элементах сети. В результате в РНС 1 формируется постоянно обновляемая модель новостных потоков и управляющих воздействий. При решении основных творческих задач блок управления системы нейрорегуляции считывает информацию о состоянии нейронов и синапсов из РНС 1 в РНС 2. Затем в зависимости от команд со стороны блока управления на РНС 2 в ней в ускоренном времени решаются творческие задачи. Среди этих задач могут выступать нейросетевое прогнозирование или восстановление пропущенных событий, формирование обоснованных управляющих решений. Например, при решении задачи управления поиском интересующих новостей после считывания информации о состоянии элементов РНС 1 в РНС 2 в эту сеть также вводится со стороны блока управления одно из альтернативных будущих управлений. РНС 2 переводится в режим ускоренного прогнозирования состояний новостных потоков. Полученные результаты прогнозирования считываются из РНС 2 в блок управления, где оцениваются по одному из заданных показателей и сохраняются вместе с вариантом управления. Затем внутренний цикл повторяется, уже с другим альтернативным управлением. В результате из конечного набора оцененных вариантов управления выбирается лучший, обеспечивающий экстремум принятого показателя эффективности. Данный вариант управления передается через РНС 2 на декодер, а затем на эффекторы и блок кодирования. После воздействия на объект управления и считывания с него информации цикл управления повторяется. Принципиальными отличиями предлагаемой архитектуры интеллектуальной системы от известных моделей [19–21] являются наличие специального блока управления и использование управляемых РНС с прозрачными логическими структурами и многоуровневой обработкой информации. Также это дает возможность решать множество различных творческих задач обработки информации нейронными сетями с непрерывным обучением без перестройки архитектуры.



■ **Рис. 2.** Блок управления рекуррентными нейронными сетями  
 ■ **Fig. 2.** The control unit for recurrent neural networks

### Алгоритмы нейроуправления

Поясним формальные аспекты предлагаемого нейроуправления, раскроем алгоритмы, реализующие его при решении ряда творческих задач на одной и той же структуре системы с непрерывным обучением. При рассмотрении этих алгоритмов учтем ранее выполненные исследования [17, 22–25].

#### Алгоритм формирования управляющих решений

Согласно этому алгоритму обрабатываемые в РНС 1 сигналы рассматриваются как две последовательности совокупностей единичных импульсов. Это последовательность  $\mathbf{SSP}^a$ , несущая информацию о новостных потоках, и последовательность  $\mathbf{SSP}^c$ , отражающая управляющие воздействия. Эти последовательности можно представить в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SSP}^c \\ \mathbf{SSP}^a \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SSP}_1^c, \mathbf{SSP}_2^c, \dots, \mathbf{SSP}_n^c \\ \mathbf{SSP}_1^a, \mathbf{SSP}_2^a, \dots, \mathbf{SSP}_n^a \end{array} \right\}. \quad (1)$$

После считывания в РНС 2 информации о состоянии РНС 1 и данных об альтернативных управлениях  $\mathbf{SSP}^{c_j}$  ее состояние можно представить в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SSP}_1^{c_j}, \mathbf{SSP}_2^{c_j}, \dots, \mathbf{SSP}_i^{c_j}, \\ \mathbf{SSP}_{i+1}^c, \mathbf{SSP}_{i+2}^c, \dots, \mathbf{SSP}_n^c \\ \emptyset_1, \emptyset_2, \dots, \emptyset_i, \mathbf{SSP}_{i+1}^a, \mathbf{SSP}_{i+2}^a, \dots, \mathbf{SSP}_n^a \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Относительно этого состояния реализация в РНС 2 ускоренного вызова информации из памяти в направлении входа сети приводит к результату

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{SSP}_1^{c_j}, \mathbf{SSP}_2^{c_j}, \dots, \mathbf{SSP}_i^{c_j}, \\ \mathbf{SSP}_{i+1}^c, \mathbf{SSP}_{i+2}^c, \dots, \mathbf{SSP}_n^c \\ \mathbf{SSP}_1^{b_j}, \mathbf{SSP}_2^{b_j}, \dots, \mathbf{SSP}_i^{b_j}, \\ \mathbf{SSP}_{i+1}^a, \mathbf{SSP}_{i+2}^a, \dots, \mathbf{SSP}_n^a \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Итоговый прогноз новостных потоков при планируемом управлении представляется в виде

$$\mathbf{SSP}^{b_j} = \left\{ \mathbf{SSP}_1^{b_j}, \mathbf{SSP}_2^{b_j}, \dots, \mathbf{SSP}_i^{b_j} \right\}. \quad (4)$$

Этот результат можно оценить, например, по показателю новизны  $\delta W_{\Sigma_j}(t^*, \mathbf{SSP}^{c_j}, \mathbf{SSP}^{b_j})$  или достоверности информации, а также по дру-

гим показателям при планируемом  $j$ -м управляющем воздействии. Звездочка при  $t$  означает, что речь идет о будущем времени. Подробное определение этого показателя будет дано ниже при рассмотрении других правил.

С учетом (1)–(4) поиск оптимального варианта управляющего воздействия сводится к выражению

$$\begin{aligned} & \delta W_{\Sigma_o}(t^*, \mathbf{SSP}^{c_o}, \mathbf{SSP}^{b_o}) = \\ & = \text{extr}_{j \in \Omega} \delta W_{\Sigma_j}(t^*, \mathbf{SSP}^{c_j}, \mathbf{SSP}^{b_j}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для этого на основании результатов функционирования РНС 1 в моменты времени  $t$  и  $t - \Delta t$  блок управления определяет суммарный прирост весов синапсов в сети

$$\begin{aligned} & \delta W_{\Sigma}(t, t - \Delta t) = \\ & = \frac{1}{M^2(\Delta t)} \sum_{m=1}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^N (w_{mis}(t) - w_{mis}(t - \Delta t)), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $M(\Delta t)$  – количество обработанных единичных сигналов на временном интервале  $\Delta t$ ;  $w_{mis}(\cdot)$  – веса отдельных  $is$ -х синапсов нейронов  $m$ -го слоя. Аналогично можно определить  $\delta W_{\Sigma}(t^*, t^* - \Delta t)$  для предсказанных РНС 2 событий.

В случаях  $\delta W_{\Sigma}(t, t - \Delta t) > \delta W_o$  обрабатываемую информацию можно считать новой. Это связано с тем, что при поступлении в нейронную сеть новой информации прирост весов синапсов имеет наибольшую крутизну.

Еще одним не менее важным показателем, по которому можно оценить новизну сигналов, является относительное количество нейронов, возбужденных в сети обработанными сигналами. Если входные сигналы, проходя через РНС на временном интервале  $\Delta t$ , вызывают в среднем за один такт относительное количество нейронов  $D(\Delta t)$  меньше заданного значения  $D_g$ :

$$D(\Delta t) = \frac{1}{Z(\Delta t)} \sum_{z=1}^{Z(\Delta t)} \frac{K_z}{S_{z-1}} < D_g, \quad (7)$$

то эти сигналы можно считать новыми. В противном случае они известны РНС. В (7) приняты обозначения:

$Z(\Delta t)$  – число тактов сети на заданном интервале времени  $\Delta t$ ,  $Z(\Delta t) = \Delta t / \delta t$ ,  $\delta t$  – длительность одного такта;

$K_z, S_{z-1}$  – число возбужденных нейронов на  $z$ -м и  $(z - 1)$ -м тактах соответственно.

Также возможно использование комплексного показателя

$$F(\Delta t) = \frac{D(\Delta t)}{\Delta W_{\Sigma}(\Delta t)}. \quad (8)$$



Что касается обработки только новостных потоков, то векторы  $\mathbf{W}_t$  весов синапсов и состояний  $\mathbf{X}_t$  нейронов в используемой РНС выражаются как

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_t &= \varphi(\mathbf{W}_{t-1}, \mathbf{X}_{t-1}, \mathbf{S}_{t-1}^a, \mathbf{U}_{t-1}); \\ \mathbf{X}_t &= \psi(\mathbf{W}_{t-1}, \mathbf{X}_{t-1}, \mathbf{S}_{t-1}^a, \mathbf{U}_{t-1}); \mathbf{S}_t^b \subset \mathbf{X}_t, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mathbf{S}_t^a$ ,  $\mathbf{S}_t^b$  – входные и выходные совокупности единичных импульсов;  $\mathbf{U}_{t-1}$  – вектор управления.

Возможность определения  $\delta W_{\Sigma}(t, t - \Delta t)$  для РНС 1 позволяет настраивать РНС 2 на выбор данных с заданными свойствами путем пропуска через сеть исходных кодированных потоков.

При решении задач нейрорегуляции различными объектами применимы и другие целевые функции. Например, поиск подходящих управлений возможен на основе стремления найти в РНС одну или несколько областей с наибольшим или наименьшим числом возбужденных нейронов в течение заданного интервала времени. В данном случае речь идет о сигналах, вызываемых из ассоциативной памяти РНС. Отметим, что каждая область возбужденных в РНС нейронов соответствует определенному информационному событию. Наибольшее число возбужденных нейронов в определенной области свидетельствует о тесной связи между обрабатываемой информацией и извлекаемыми из памяти сигналами.

Заметим, что при обработке информации по условиям (2), (3) в памяти нейросети могут быть реализованы различные интеллектуальные операции над сигналами. Основой таких операций является управляемый ассоциативный вызов сигналов из такой памяти. Ранее такие возможности в известных работах не рассматривались.

#### Алгоритмы восстановления и синтеза новостных потоков

В случаях восстановления прошедших, но не воспринятых РНС 1 новостных потоков, с учетом (9) применимы правила

$$\begin{aligned} \{\mathbf{W}_t, \mathbf{X}_t\} &\rightarrow \{\mathbf{W}_t^*, \mathbf{X}_t^*\} \rightarrow \{\mathbf{W}_t^{*U} = \mathbf{W}_t^* \circ \mathbf{U}_t^*, \mathbf{X}_t^*\}; \\ \mathbf{W}_t^{*U} &= \varphi(\mathbf{W}_{t-1}^{*U}, \mathbf{X}_{t-1}^*); \\ \mathbf{X}_t^* &= \psi(\mathbf{W}_{t-1}^{*U}, \mathbf{X}_{t-1}^*); \mathbf{S}_t^{*b} \subset \mathbf{X}_t^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметры  $\{\mathbf{W}_t, \mathbf{X}_t\}$  без звездочки относятся РНС 1, а обозначенные звездочкой – к РНС 2.

Наличие звездочки у  $t$  характеризует обработку новостных потоков РНС 2 в ускоренном времени. Индекс  $U$  при  $\mathbf{W}$  отражает реализацию

управления ассоциативным взаимодействием сигналов в РНС 2. Обозначение  $\mathbf{U}_t^*$  соответствует вектору управления. Отметим, что при восстановлении прошедших потоков необходимо усиливать ассоциативный вызов сигналов в направлении выхода сети, а при прогнозировании, наоборот, в направлении входа сети. Формализованная схема восстановления пропущенных потоков имеет вид

$$\begin{aligned} &\{\mathbf{SSP}_1^a, \mathbf{SSP}_2^a, \dots, \mathbf{SSP}_i^a, \emptyset_{i+1}, \emptyset_{i+2}, \dots, \emptyset_n\} \rightarrow \\ &\rightarrow \{\mathbf{SSP}_1^a, \mathbf{SSP}_2^a, \dots, \mathbf{SSP}_i^a, \mathbf{SSP}_{i+1}^b, \\ &\mathbf{SSP}_{i+2}^b, \dots, \mathbf{SSP}_n^b\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для случаев, когда требуется синтезировать новостной поток по его окончаниям, применима схема

$$\begin{aligned} &\{\mathbf{SSP}_1^a, \mathbf{SSP}_2^a, \emptyset_3, \emptyset_4, \dots, \emptyset_{n-2}, \mathbf{SSP}_{n-1}^a, \mathbf{SSP}_n^a\} \rightarrow \\ &\rightarrow \{\mathbf{SSP}_1^a, \mathbf{SSP}_2^a, \mathbf{SSP}_3^b, \mathbf{SSP}_4^b, \dots, \\ &\mathbf{SSP}_{n-2}^b, \mathbf{SSP}_{n-1}^a, \mathbf{SSP}_n^a\}. \end{aligned} \quad (12)$$

При такой схеме управление ассоциативным вызовом сигналов из памяти РНС 2 сводится к усилению в направлении центра сети.

Помимо этих возможно решение и других творческих задач путем управления РНС. В частности, РНС 1 может решать задачу распознавания воздействия на новостные потоки, например обнаружения фрагментов данных, не соответствующих контексту. Также в РНС 2 возможен более глубокий анализ выявленных аномалий в новостных текстах за счет усиления многократного рекуррентного вызова связанной с ними информации. Отметим, что за счет реализации приоритетных сильных связей в РНС обеспечивается взаимно однозначное соответствие между входами и выходами сетей, что позволяет успешно преобразовывать результаты обработки в соответствующие им исходные сигналы.

#### Наборы данных, параметры применяемых РНС и результаты моделирования

##### Наборы данных и параметры применяемых РНС

Для проверки корректности предлагаемых нейросетевых решений использовались различные потоковые данные после предварительной обработки с учетом известных правил [26]. Для исследования нейросетевого управления с ис-

пользованием одноуровневых РНС был сформирован тестовый набор из новостных текстов с сайтов-агрегаторов новостей <http://finam.ru>, <http://rbc.ru>, <http://mail.ru> и статей с сервиса <http://zen.yandex.ru>. Он составил 300 000 текстов без дублирования. Для подготовки наборов данных выполнен полный сбор всех доступных страниц ресурсов с последующим анализом, фильтрацией и индексацией. Все собранные из открытых источников документы были преобразованы из исходного формата (HTML, XML, DOC, PDF, ODT) в формат обычного текста без разметки, служебных областей и рекламных материалов. Они были нормализованы (удалены ненужные служебные символы) и приведены к единой кодовой таблице UTF-8. Обрабатываемым словам из текста (в качестве идентификатора токена) были назначены единичные импульсы в пространстве входных полей слоев РНС. Эксперименты проводились с использованием двухслойных потоковых РНС, содержащих от 1890 до 28 800 нейронов в каждом слое. В этих сетях за счет пространственных сдвигов обрабатываемых СЕИ слои разделялись на логические поля размерами  $6 \times 7$ ,  $60 \times 20$ ,  $60 \times 60$  нейронов. Размеры логических полей, на которые были разделены слои РНС, определены в зависимости от размеров словаря входных сигналов и способа их кодирования. Количество логических полей в каждом слое определялось с учетом интервала времени, на котором обрабатываемые сигналы должны быть связаны друг с другом, и длительности одного цикла работы сети. Количество нейронов в каждом слое РНС равнялось их количеству в одном логическом поле, умноженному на число этих полей. Непрерывное обучение РНС возможно при скорости подачи сигналов в сеть, не превышающей обратной величины времени невосприимчивости нейронов после возбуждения. Использовались РНС со спиральной и петлевой логическими структурами.

### Результаты моделирования

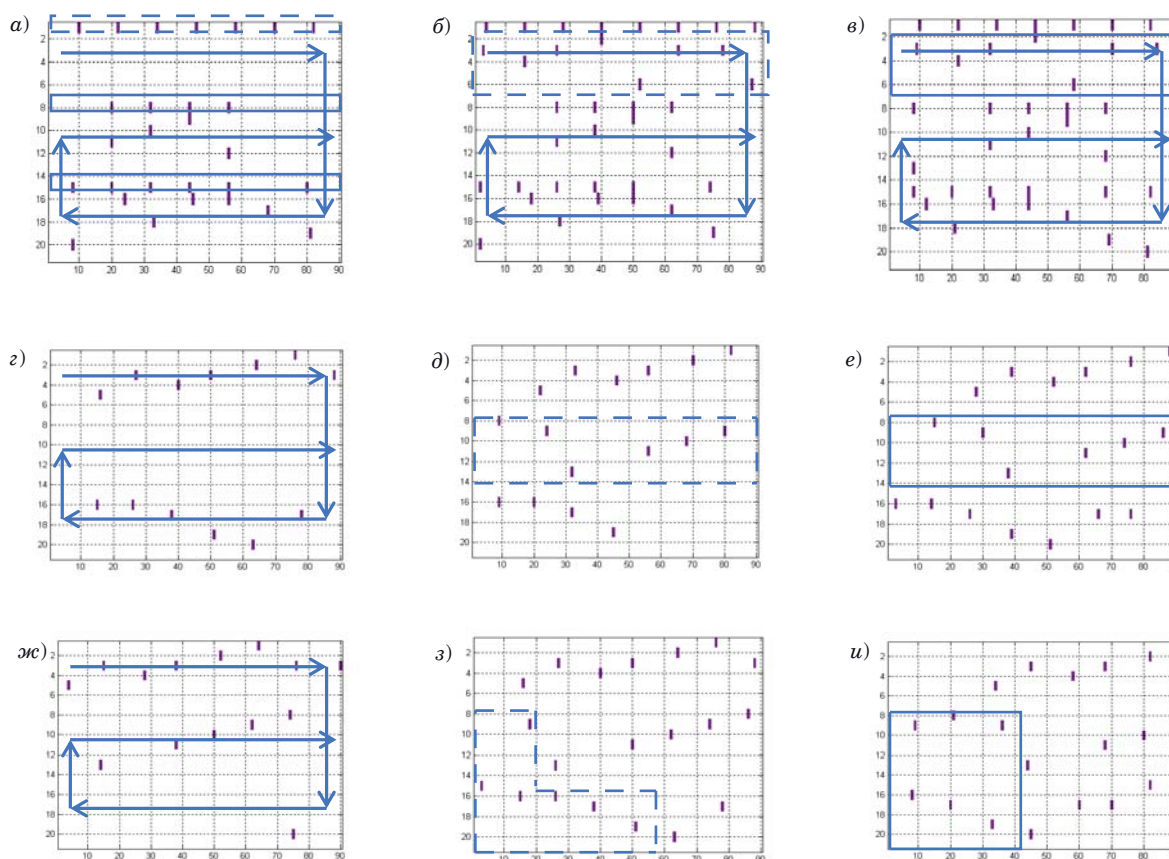
Для подтверждения работоспособности предлагаемой системы было выполнено ассоциативное связывание в РНС 1 ряда действий над источниками информации (в частности, различными запросами) и их реакциями. Затем блок управления осуществлял поиск соответствующих действий с учетом результатов прогнозирования новостных потоков РНС 2. Каждый слой в этих РНС состоял из 3150 скалярных импульсных нейронов. В РНС были реализованы петлевые логические структуры. При этом использовалось кодирование входных сигналов, исключаящее пересечение в пространстве сформированных СЕИ. Каждому обрабатываемому слову в РНС был сопоставлен свой одиночный импульс в пространстве и времени. В каждой РНС обеспе-

чивалось однозначное соответствие между входом и выходом за счет приоритизации сильных связей между нейронами. Вариант работы системы нейроуправления (см. рис. 1) был реализован с использованием одноуровневых РНС. Затем производился поиск соответствующих действий блоком управления с учетом результатов прогнозирования новостных потоков РНС 2. Пример такого прогнозирования показан на рис. 3, а–в.

Стрелками на рис. 3 показаны направления продвижения обработанных СЕИ по слоям. В приведенном примере результаты прогнозирования точно совпали с эталонными значениями. Каждому пространственно связанному одиночному импульсу было присвоено определенное слово. Высокий результат такого прогнозирования обеспечивался исключением пересечений СЕИ, введенных в систему. Аналогичная точность достигалась и при восстановлении пропущенных информационных событий. В случаях наличия пересечений СЕИ точность снижалась.

Пример результатов нейросетевого восстановления прошлых событий перед поиском управляющих решений представлен на рис. 3, г–е. На рис. 3, ж–и представлен пример нейросетевого синтеза событий. Рис. 3, в, е, и соответствуют начальным состояниям первого слоя РНС 2. На рис. 3, д, з полученные результаты отмечены штрихпунктирными линиями. Сигналы, отмеченные сплошными линиями на рис. 3, е, и, соответствуют эталонам. Результаты на рис. 3 соответствуют обработке кодовой последовательности слов *“Two roads diverged in a yellow wood, and sorry I could not travel both and be one traveler, long I stood and looked down one as far as I could to where it bent in the undergrowth”* из работы *The Road Not Taken* Роберта Ли Фроста. Во всех этих экспериментах результаты были получены с точностью 100 % ввиду отсутствия пересечения между СЕИ из-за разреженного кодирования.

С помощью нейросетевой системы была проведена серия экспериментов по выявлению новизны обработанных текстов в сравнении с уже обработанными новостями. В каждом эксперименте новостной поток состоял из двух тематических групп по 75 текстов. Общая длина последовательности составила 150 текстов. Оценивались приросты суммарных весов синапсов при обработке таких последовательностей и ошибки выявления факта новизны обработанного текста. Установлено, что возможности выявления факта новизны обработанных текстов существенно зависят от принятого абсолютного или относительного порога его выявления. Средние ошибки выявления новизны текстов в экспериментах с критерием  $\delta W_{\Sigma}(t, t - \Delta t) > \Delta W_0$  составили от 10 до 30 %. При использовании комплексного показателя  $F(\Delta)$  (8) и критерия  $F(\Delta) < F_0$  ошиб-



■ **Рис. 3.** Примеры состояний первого слоя РНС 2: *a, z, жс* — до начала; *б* — результат прогнозирования; *д* — результат восстановления прошедших событий; *з* — результат синтеза событий; *в, е, и* — эталонное состояние

■ **Fig. 3.** Examples of states of the first layer of recurrent neural networks 2: *a, z, жс* — before the start; *б* — forecasting result; *д* — result of reconstruction of past events; *з* — result of event synthesis; *в, е, и* — reference state

ки были снижены до 1–9 %. Фильтруя тексты во второй РНС на основе новых связей и путем последующего отбора новых блоков текста в исходном новостном потоке, удалось сформировать новостные дайджесты. Функциональность предлагаемой системы определялась как сумма вероятностей получения успешных решений творческих задач, а интеллект оценивался таким же образом, но с учетом веса каждой из задач.

## Обсуждение

Говоря о сравнении с существующими методами, отметим следующее. Предлагаемый метод и система, его реализующая, основаны на изобретении [22] по интеллектуальной нейросетевой обработке больших потоков данных. Как и решения [17, 23–25], предлагаемый метод использует пару нейронных сетей. В одном из вариантов метода возможна их параллельная симметричная работа. Однако, в отличие от [17, 22–24], предлагаемая система использует управляемые

многоуровневые РНС с прозрачной логической организацией, с непрерывным обучением, способные решать творческие задачи на верхних уровнях, не прерывая этого обучения. Такие возможности не предусмотрены в известных алгоритмах. Кроме того, помимо пары идентичных РНС, предлагаемая система включает в себя специальный блок управления этими сетями. Во втором варианте предлагаемый метод предусматривает непрерывное обучение РНС 1 и трансферное обучение РНС 2. Трансферное обучение предполагает периодическую передачу информации о состояниях нейронов и синапсов РНС 1 в РНС 2. В нашем случае в РНС 2 дополнительно передаются альтернативные решения управления из блока управления. Передача информации из РНС 1 в РНС 2 необходима для того, чтобы избежать прерывания обучения РНС 1. В РНС 2 на основе этой информации решаются творческие задачи путем управления процессами ассоциативного вызова сигналов из памяти нейронной сети. Возможно решение многих сложных нелинейных задач с использованием одной и той

же нейросетевой системы с непрерывным обучением без ее перестройки. К ним относятся предиктивное управление новостными потоками и другими процессами, их ассоциативный выбор на основе различных свойств, а также контролируемое восстановление и синтез. При предлагаемом нейросетевом управлении с непрерывным обучением возможен поиск соответствующих воздействий на объекты управления с оценкой ожидаемых эффектов. Это достижимо за счет многократного многошагового нейросетевого прогнозирования событий при тех же внешних условиях, но с альтернативными управляющими воздействиями. Это касается и реконструкции событий в условиях неопределенности. Развитие интеллектуальности и функциональности нейросетевой обработки достигается за счет разработки новых решений по управлению нейросетями. Рекуррентные нейронные сети и их элементы наделены новыми свойствами, которые позволяют расширять память нейронных сетей и осуществлять многоуровневую продольную и поперечную ассоциативную обработку сигналов с непрерывным обучением.

В отличие от генеративных моделей, таких как GPT [27, 28], предлагаемые решения не требуют предварительного обучения на размеченных наборах данных. Предлагаемые решения основаны не на правилах преобразования, а на управляемой многоуровневой пространственно-временной ассоциативной обработке. Разработанная интеллектуальная система нейроруководения может связывать реальные потоки событий в пространстве и времени и вырабатывать соответствующие управляющие решения с учетом их и ранее сохраненной информации. Согласно предлагаемому методу можно осуществлять различные интеллектуальные операции во времени и пространстве над сигналами в памяти нейронной сети на основе управления их ассоциативной обработкой. Современные модели GPT могут успешно автоматизировать многие процессы, связанные с текстом (генерацию, машинный перевод, классификацию), но они не могут осознать свои действия. Это алгоритмы, работающие по строгим правилам на одном уровне иерархии, без оценки новизны и надежности обрабатываемых потоков. Эти алгоритмы не могут обеспечить безмодельное управление сложными нелинейными объектами с оценкой возможных эффектов. Без полноценной многоуровневой ассоциативной обработки сигналов невозможно построение систем с сильным искусственным интеллектом. Полученные авторами результаты позволяют снять ряд ограничений и расширить интеллектуальность и функциональность нейросетевых систем для обработки больших потоков данных, а также обеспечить более высокий уровень доверия к ним. Последнее,

наряду с другими факторами, достигается за счет наделения используемых РНС логически прозрачными одно- и многоуровневыми логическими структурами.

В практическом плане наиболее простым новым вариантом реализации системы нейроруководения (см. рис. 1) является использование двух идентичных потоковых двухслойных РНС с одноуровневыми логическими структурами. Для преодоления вычислительной сложности реализации предлагаемой нейросетевой системы программными средствами предусматривается эмулирование входящих в ее состав РНС специальными программами определяемыми нейрочипами. Это могут быть цифровые нейрочипы или аналоговые микросхемы на основе мемристивных энергоэффективных технологий. Прогресс в создании требуемых нейрочипов уже есть [29]. Это также требует дальнейшей разработки идей формирования соответствующих управляющих решений в РНС на основе анализа обрабатываемой и хранимой информации. Необходима дальнейшая разработка методов управления временем обработки сигналов в РНС. РНС должны иметь возможность успешно обрабатывать события прошлого, настоящего и будущего времени в различных масштабах. Во всех случаях невозможно обойтись без соответствующих архитектурных и алгоритмических решений для построения как систем нейроруководения, используемых РНС, так и ее элементов. Предложенные в статье решения позволяют расширить взгляды на возможные пути построения интеллектуальных систем нейроруководения различными объектами.

К ограничениям предлагаемого метода и системы, его реализующей, можно отнести следующие. Время выработки управляющих решений не должно превышать предельно допустимого значения для конкретных объектов управления. Интеллектуальная система должна быть реализована средствами, позволяющими ей удовлетворять этому требованию. Для полноценного управления необходимо, чтобы в РНС 1 формировалась адекватная модель воспринимаемого процесса при ее непрерывном обучении. Частота считывания информации из РНС 1 в РНС 2 в этой системе должна быть меньше обратной величины времени обработки сигнала в РНС 2. Размеры РНС 1, 2 должны позволять им обрабатывать последовательности совокупностей единичных импульсов заданной длительности. Энергозатраты на обеспечение работы интеллектуальной системы нейроруководения и ее размерности не должны превышать допустимых требований.

Сложность решения задачи программного моделирования предлагаемой интеллектуальной системы нейроруководения на скалярных процессорах прямо пропорциональна квадрату числа

$N$  нейронов в слоях ее нейронных сетей. При использовании графических процессоров она потенциально может быть снижена в  $N$  раз. Для полноценной практической реализации предлагаемой интеллектуальной системы нейроруления рекомендуется аппаратная реализация с использованием энергонезависимой мемристивной памяти и энергоэффективных импульсных нейронов.

## Заключение

В результате исследования достигнута цель расширения интеллектуальности и функциональности нейросетевых систем управления. При достижении этой цели получены следующие результаты:

- разработана новая архитектура интеллектуальной нейросетевой системы с непрерывным обучением, способная решать существенно расширенный набор творческих задач по обработке и управлению новостными потоками и другими объектами;
- разработаны алгоритмы нейроруления, позволяющие интеллектуально решать новые задачи в нейросетевой памяти;
- сформулированы новые рекомендации по построению перспективных систем нейроруления.

Отличие предлагаемой архитектуры с интеллектуальным нейросетевым ядром от известных решений заключается в новом составе элементов и связей между ними, а также в комплексе реализованных алгоритмов нейроруления. Предложенная архитектура позволяет решать многие творческие задачи с непрерывным обучением без ее перестройки. Предложенный метод позволяет реализовать управляемую многоуровневую нейросетевую обработку на основе новых ассоциативных принципов. Сформулированные новые рекомендации по построению перспективных систем нейроруления позволяют ускорить их разработку и использование на практике. В качестве направлений дальнейших исследований по созданию перспективных интеллектуальных систем нейроруления следует выделить наделение их искусственным мышлением, поиск решений по снижению сложности реализации, а также методов энергоэффективной и малогабаритной реализации.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет государственного задания СПб ФИЦ РАН, бюджетная тема FFZF-2022-0005.

## Литература

1. **Omatu S., Khalid M., Yusof R.** *Neuro-Control and its Applications, Advances in Industrial Control*. Springer-Verlag New York, LLC, 2011. 255 p. doi:10.1007/978-1-4471-3058-1
2. **Wu B., Wu J., Zhang J., Tang G., Zhao Z.** Adaptive neural control of a 2DOF helicopter with input saturation and time-varying output constraint. *Actuators*, 2022, vol. 11, iss. 11, p. 336. doi:10.3390/act11110336
3. **Jiang B., Li B., Zhou W., Lo L.-Y., Chen C.-K., Wen C.-Y.** Neural network based model predictive control for a quadrotor UAV. *Aerospace*, 2022, vol. 9, iss. 8, p. 460. doi:10.3390/aerospace9080460
4. **Новикова О. А.** Моделирование и прогнозирование динамики событий в новостных лентах на основе простой диффузионной модели. *Cloud of Science*, 2020, т. 7, № 3, с. 619–643. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-prognozirovanie-dinamiki-sobytyiy-v-novostnyh-lentah-na-osnove-prostoy-diffuzionnoy-modeli/viewer> (дата обращения: 04.04.2024).
5. **Kalyan K. S.** A survey of GPT-3 family large language models including ChatGPT and GPT-4. *Natural Language Processing Journal*, 2024, vol. 6, Article 100048. doi:10.1016/j.nlp.2023.100048
6. **McDermott M. B. A., Nestor B., Argaw P., Kohane I.** Event stream GPT: A data pre-processing and modeling library for generative, pre-trained transformers over continuous-time sequences of complex events. <https://arxiv.org/abs/2306.11547> (дата обращения: 04.04.2024).
7. **Szwoch J., Staszko M., Rzepka R., Araki K.** Limitations of large language models in propaganda detection task. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, vol. 14, no. 10, p. 4330. doi:10.3390/app14104330
8. **von der Malsburg C.** Toward understanding the neural code of the brain. *Biological Cybernetics*, 2021, vol. 115, pp. 439–449. doi:10.1007/s00422-021-00903-8
9. **Haykin S.** *Neural Networks and Learning Machines*. Third ed. Prentice Hall, New York, 2008. 906 p.
10. **Bicanski A., Burgess N.** Neural vector coding in spatial cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 2020, vol. 21, pp. 453–470. doi:10.1038/s41583-020-0336-9
11. **Yamakawa H.** The whole brain architecture approach: Accelerating the development of artificial general intelligence by referring to the brain. *Neural Networks*, 2021, vol. 144, pp. 478–495. doi:10.1016/j.neunet.2021.09.004
12. **Du Y., Wang L., Peng Z., Guo W.** Review-based hierarchical attention cooperative neural networks for recommendation. *Neurocomputing*, 2021, vol. 447, pp. 38–47. doi:10.1016/j.neucom.2021.03.098

13. Saha S., Gan Z., Cheng L., Gao J., Kafka O., Xie X., Li H., Tajdari M., Kim H., Liu W. Hierarchical deep learning neural network (HiDeNN): An artificial intelligence (AI) framework for computational science and engineering. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, vol. 373, Article 113452. doi:10.1016/j.cma.2020.113452
14. Macpherson T., Matsumoto M., Gomi H., Morimoto J., Uchibe E., Nikida T. Parallel and hierarchical neural mechanisms for adaptive and predictive behavioral control. *Neural Networks*, 2021, vol. 144, pp. 507–521. doi:10.1016/j.neunet.2021.09.009
15. Buhusi C., Oprisan S., Buhusi M. Biological and cognitive frameworks for a mental timeline. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, p. 377. doi:10.3389/fnins.2018.00377
16. Raphan T., Dorokhin E., Delamater A. Modeling interval timing by recurrent neural nets. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 13, p. 46. doi:10.3389/fnint.2019.00046
17. Osipov V., Nikiforov V., Zhukova N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers. *Neural Computing and Applications*, 2020, vol. 32, pp. 14885–14897. doi:10.1007/s00521-020-04843-5
18. Огий О. Г., Осипов В. Ю. Нейросетевое прогнозирование трудового потенциала экипажей рыбопромысловых судов. *Морские интеллектуальные технологии*, 2023, № 4, ч. 1, с. 214–223. doi:10.37220/МИТ.2023.62.4.026
19. Xiao Z., Xing H., Zhao B., Qu R. Deep contrastive representation learning with self-distillation. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2024, vol. 8, iss. 1, pp. 3–15. doi:10.1109/TETCI.2023.3304948
20. Xiao Z., Xing H., Qu R., Feng L., Luo S., Dai P., Zhao B. and Dai Y. Densely knowledge-aware network for multivariate time series classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, vol. 54, iss. 4, pp. 2192–2204. doi:10.1109/TSMC.2023.3342640
21. Zarchi M., Shahgholi M. A novel information fusion approach using weighted neural networks for intelligent multi-class diagnostics of rotating machinery with unseen working conditions. *Journal of Vibration and Control*, 2023, vol. 29, iss. 23-24, pp. 5545–5562. doi:10.1177/10775463221138172
22. Пат. RU2737227 C1. Способ интеллектуальной многоуровневой обработки информации в нейронной сети, В. Ю. Осипов. № 2020114192; заявл. 20.4.2020; опубл. 26.11.2020, Бюл. № 33.
23. Osipov V., Kuleshov S., Zaytseva A., Levonevskiy D., Miloserdov D. Neural network forecasting of news feeds. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 169, Article 114521. doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114521
24. Осипов В. Ю., Кулешов С. В., Милосердов Д. И., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю. Рекуррентные нейронные сети с непрерывным обучением в задачах многофункциональной обработки новостных потоков. *Информатика и автоматизация*, 2022, т. 21, № 6, с. 1145–1168. doi:10.15622/ia.21.6.3
25. Милосердов Д. И. Усовершенствованная система нейросетевого прогнозирования групп временных рядов с непрерывным обучением. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 1, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2024-1-20-30, EDN: FRWKWP
26. Ковалев А. Д., Никифоров И. В., Дробинцев П. Д. Автоматизированный подход к семантическому поиску по программной документации на основе алгоритма Doc2Vec. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 1, с. 17–27. doi:10.31799/1684-8853-2021-1-17-27
27. *Open AI GPT-4 Technical Report*. arXiv:2303.08774 [cs.CL]. <https://arxiv.org/abs/2303.08774> (дата обращения: 04.04.2024).
28. Wolfram S. *What is Chat GPT doing and why does it Work?* <https://writings.stephenwolfram.com/2023/02/what-is-chatgpt-doing-and-why-does-it-work/> (дата обращения: 04.04.2024).
29. Yao P., Wu H., Gao B., Tang J., Zhang Q., Zhang W., Yang J. J., Qian H. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network. *Nature*, 2020, vol. 577, pp. 641–646. doi:10.1038/s41586-020-1942-4

UDC 621.396

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-35-45

EDN: IDATPB

**Intelligent neurocontrol of news streams with continuous learning**V. Y. Osipov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-5905-4415, osipov\_vasily@mail.ruS. V. Kuleshov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor RAS, orcid.org/0000-0002-8454-5598A. A. Zaytseva<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-1345-8550D. I. Miloserdov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-5312-5531<sup>a</sup>St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Neural network control (neurocontrol) of various nonlinear objects is of great theoretical and practical interest. However, the level of intelligence and functionality of known solutions for such management does not largely satisfy the needs of practice. **Purpose:** To develop a method and system of neurocontrol with advanced intelligence and functionality. **Methods:** To achieve the goal, we propose new neural network solutions, aimed at processing news streams with changing laws of behavior and at developing control decisions

under these conditions. **Results:** We propose the architecture of an intelligent neural network system with continuous learning, capable of solving a significantly expanded set of creative problems without its restructuring. In particular, these are the problems of neural network recognition, forecasting, event reconstruction, event synthesis, news flow and other object management. We develop a new method of multi-level neural network information processing in recurrent neural networks with controlled elements. We propose new neural network control algorithms, allowing intelligent solving of problems of news flow neural control with continuous learning. The comparative analysis of the obtained results with known models and methods has shown the effectiveness of the proposed approaches. **Practical relevance:** The proposed architecture enables the solution of many creative problems with continuous learning without restructuring this architecture. With the proposed method it is possible to implement controlled multi-level neural network processing based on new associative principles. With the new recommendations for building promising neural control systems being, it is possible to accelerate their development and use in practice. **Discussion:** We give recommendations for the creation of promising systems of neurocontrol of news flows with continuous learning. Among the areas of further research on the creation of promising intelligent systems of neurocontrol, it is necessary to highlight their endowment with artificial thinking, the search for the solutions to reduce the complexity of implementation, as well as methods of energy-efficient and small-sized implementation.

**Keywords** – neural network control, intelligence, continuous learning, news flow processing.

**For citation:** Osipov V. Y., Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Miloserdov D. I. Intelligent neurocontrol of news streams with continuous learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 35–45 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-35-45, EDN: IDATPB

## References

- Omatu S., Khalid M., Yusof R. *Neuro-Control and its Applications, Advances in Industrial Control*. Springer-Verlag New York, LLC, 2011. 255 p. doi:10.1007/978-1-4471-3058-1
- Wu B., Wu J., Zhang J., Tang G., Zhao Z. Adaptive neural control of a 2DOF helicopter with input saturation and time-varying output constraint. *Actuators*, 2022, vol. 11, iss. 11, p. 336. doi:10.3390/act11110336
- Jiang B., Li B., Zhou W., Lo L.-Y., Chen C.-K., Wen C.-Y. Neural network based model predictive control for a quadrotor UAV. *Aerospace*, 2022, vol. 9, iss. 8, p. 460. doi:10.3390/aerospace9080460
- Novikova O. A. Modeling and forecasting the dynamics of events in news feeds based on a simple diffusion model. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 619–643. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-prognozirovanie-dinamiki-sobytyi-v-novostnyh-lentah-na-osnove-prostoy-diffuzionnoy-modeli/viewer> (accessed 04 April 2024) (In Russian).
- Kalyan K. S. A survey of GPT-3 family large language models including ChatGPT and GPT-4. *Natural Language Processing Journal*, 2024, vol. 6, Article 100048. doi:10.1016/j.nlp.2023.100048
- McDermott M. B. A., Nestor B., Argaw P., Kohane I. Event stream GPT: A data pre-processing and modeling library for generative, pre-trained transformers over continuous-time sequences of complex events. Available at: <https://arxiv.org/abs/2306.11547> (accessed 04 April 2024).
- Szwoch J., Staszko M., Rzepka R., Araki K. Limitations of large language models in propaganda detection task. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, vol. 14, no. 10, p. 4330. doi:10.3390/app141043308.
- von der Malsburg C. Toward understanding the neural code of the brain. *Biological Cybernetics*, 2021, vol. 115, pp. 439–449. doi:10.1007/s00422-021-00903-8
- Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. Third ed. Prentice Hall, New York, 2008. 906 p.
- Bicanski A., Burgess N. Neural vector coding in spatial cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 2020, vol. 21, pp. 453–470. doi:10.1038/s41583-020-0336-9
- Yamakawa H. The whole brain architecture approach: Accelerating the development of artificial general intelligence by referring to the brain. *Neural Networks*, 2021, vol. 144, pp. 478–495. doi:10.1016/j.neunet.2021.09.004
- Du Y., Wang L., Peng Z., Guo W. Review-based hierarchical attention cooperative neural networks for recommendation. *Neurocomputing*, 2021, vol. 447, pp. 38–47. doi:10.1016/j.neucom.2021.03.098
- Saha S., Gan Z., Cheng L., Gao J., Kafka O., Xie X., Li H., Tajdari M., Kim H., Liu W. Hierarchical deep learning neural network (HiDeNN): An artificial intelligence (AI) framework for computational science and engineering. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, vol. 373, Article 113452. doi:10.1016/j.cma.2020.113452
- Macpherson T., Matsumoto M., Gomi H., Morimoto J., Uchibe E., Nikida T. Parallel and hierarchical neural mechanisms for adaptive and predictive behavioral control. *Neural Networks*, 2021, vol. 144, pp. 507–521. doi:10.1016/j.neunet.2021.09.009
- Buhusi C., Oprisan S., Buhusi M. Biological and cognitive frameworks for a mental timeline. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, p. 377. doi:10.3389/fnins.2018.00377
- Raphan T., Dorokhin E., Delamater A. Modeling interval timing by recurrent neural nets. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 13, p. 46. doi:10.3389/fnint.2019.00046
- Osipov V., Nikiforov V., Zhukova N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers. *Neural Computing and Applications*, 2020, vol. 32, pp. 14885–14897. doi:10.1007/s00521-020-04843-5
- Ogij O., Osipov V. Neural network forecasting of labor potential of fishing vessel crews. *Marine Intellectual Technologies*, 2023, no. 4, part 1, pp. 214–223 (In Russian). doi: 10.37220/MIT.2023.62.4.026
- Xiao Z., Xing H., Zhao B., Qu R. Deep contrastive representation learning with self-distillation. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2024, vol. 8, iss. 1, pp. 3–15. doi:10.1109/TETCI.2023.3304948
- Xiao Z., Xing H., Qu R., Feng L., Luo S., Dai P., Zhao B. and Dai Y. Densely knowledge-aware network for multivariate time series classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, vol. 54, iss. 4, pp. 2192–2204. doi:10.1109/TSMC.2023.3342640
- Zarchi M., Shahgholi M. A novel information fusion approach using weighted neural networks for intelligent multi-class diagnostics of rotating machinery with unseen working conditions. *Journal of Vibration and Control*, 2023, vol. 29, iss. 23-24, pp. 5545–5562. doi:10.1177/10775463221138172
- Osipov V. Y. *Sposob intellektual'noy mnogourovnevoy obrabotki informatsii v neyronnoy seti* [Method for intelligent multi-level information processing in neural network]. Patent no. RU 2737227 C1, 2020.
- Osipov V., Kuleshov S., Zaytseva A., Levonevskiy D., Miloserdov D. Neural network forecasting of news feeds. *Expert systems with applications*, 2021, vol. 169, p. 114521. doi. org/10.1016/j.eswa.2020.114521
- Osipov V., Kuleshov S., Miloserdov D., Zaytseva A., Aksenov A. Recurrent neural networks with continuous learning in problems of news streams multifunctional processing. *Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 6, pp. 1145–1168 (In Russian). doi:10.15622/ia.21.6.3
- Miloserdov D. I. Advanced neural network forecasting system with continuous learning for grouped time series. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 1, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-1-20-30, EDN: FRWKWP
- Kovalev A. D., Nikiforov I. V., Drobintsev P. D. Automated approach to semantic search through software documentation based on Doc2Vec algorithm. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 1, pp. 17–27 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-1-17-27
- Open AI GPT-4 Technical Report*. arXiv:2303.08774 [cs.CL]. Available at: <https://arxiv.org/abs/2303.08774> (accessed 04 April 2024).
- Wolfram S. *What is Chat GPT doing and why does it Work?* Available at: <https://writings.stephenwolfram.com/2023/02/what-is-chatgpt-doing-and-why-does-it-work/> (accessed 04 April 2024)
- Yao P., Wu H., Gao B., Tang J., Zhang Q., Zhang W., Yang J. J., Qian H. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network. *Nature*, 2020, vol. 577, pp. 641–646. doi:10.1038/s41586-020-1942-4



## Модели смешанного целочисленного линейного программирования оптимизации включения заданий в пакеты и порядков проведения операций с ними в конвейерных системах

К. В. Кротов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-9670-6141](https://orcid.org/0000-0002-9670-6141), [krotov\\_k1@mail.ru](mailto:krotov_k1@mail.ru)

<sup>а</sup>Севастопольский государственный университет, Университетская ул., 33, Севастополь, 299053, РФ

**Введение:** идентификация эффективных расписаний выполнения в конвейерных системах наборов однотипных заданий предусматривает поиск лучших решений по включению заданий из этих наборов в пакеты и по порядкам пакетов для осуществления операций с ними на приборах указанных систем. При незначительном размере задач решить их возможно путем построения математических моделей смешанного целочисленного линейного программирования. **Цель:** разработать математические модели смешанного целочисленного линейного программирования, позволяющие определять лучшие решения по включению однотипных заданий из наборов в пакеты и по порядкам пакетов для проведения операций с ними в конвейерных системах. **Результаты:** в концепцию разработки математических моделей указанного вида положен подход, связанный с типизацией заданий. В соответствии с ним к одному типу относятся задания с равными значениями длительностей их выполнения на приборах конвейерных систем и с равными значениями длительностей переналадок приборов на осуществление операций с ними. На основе этого подхода разработаны математические модели смешанного целочисленного нелинейного программирования, позволяющие включить задания из наборов в пакеты и осуществить оптимизацию их порядков для реализации операций с ними в конвейерных системах. Условиями оптимизации являются: минимизация общего времени выполнения пакетов заданий на приборах конвейерных систем; минимизация суммарного запаздывания с окончанием выполнения наборов заданий по сравнению с заданными для них директивными сроками. Полученные модели линеаризованы путем введения дополнительных переменных и соответствующих им ограничений. Предложен способ линеаризации операции определения максимума из двух значений, предусматривающий введение индикаторных переменных и позволивший повысить производительность вычислений. В целях верификации представленных моделей разработано приложение в среде IBM ILOG CPLEX. С его применением проведены исследования по оптимизации составов пакетов заданий и расписаний их выполнения для различных наборов значений параметров задач поиска эффективных решений. **Практическая значимость:** полученные результаты показали эффективность разработанных моделей при решении задач оптимизации в рассматриваемой постановке. Предложенные математические модели позволяют повысить степень использования ресурсов конвейерных систем разного вида при реализации в них производственных или вычислительных процессов.

**Ключевые слова** – конвейерные системы, пакеты заданий, расписания, модели смешанного целочисленного линейного программирования.

**Для цитирования:** Кротов К. В. Модели смешанного целочисленного линейного программирования оптимизации включения заданий в пакеты и порядков проведения операций с ними в конвейерных системах. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 46–57. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-46-57, EDN: EFCACX

**For citation:** Krotov K. V. Models of mixed integer linear programming for optimizing the inclusion of tasks in packages and the order of operations with them in pipeline systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 46–57 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-46-57, EDN: EFCACX

### Введение

В многостадийных системах потокового типа (конвейерных системах, КС; системах FlowShop) требуется осуществить операции с заданиями, включенными в наборы, в порядке, соответствующем порядку приборов в системах. Типизация заданий предусматривает использование следующих временных характеристик: времени проведения операций с заданиями на приборах, времени переналадок приборов на реализацию операций с заданиями. Условием эффективной реализации процессов выполнения заданий из их наборов является формирование пакетов и определение расписаний их выполнения в КС.

При значительной размерности указанной задачи ее решение не может быть получено за ограниченное время, определяемое полиномом, включающим ее (этой задачи) параметры (задача является NP-трудной). Для задач рассматриваемого вида, имеющих большую размерность, автором предложен метод иерархической оптимизации [1], позволяющий осуществлять поиск эффективных решений по включению однотипных заданий в пакеты и по порядкам проведения операций с ними на приборах КС. Также для определения эффективных решений по включению заданий в пакеты использован метод ветвей и границ [2]. Он же применен для определения эффективных порядков пакетов заданных со-



ставов для проведения операций с ними в КС [3]. При малых размерах задач возможно использовать аппарат смешанного целочисленного линейного программирования (mixed-integer linear programming, MILP) и искать решения в соответствующих пакетах — решателях задач дискретной оптимизации. Это позволяет значительно сократить время на разработку программ поиска эффективных решений и уменьшить время получения результатов оптимизации.

При построении моделей MILP необходимо различать: 1) задачу определения лучших решений по включению однотипных заданий в пакеты (оптимизации количества заданий в пакетах); 2) задачу оптимизации распределения единичных заданий по пакетам. В настоящее время более развит подход, связанный с разработкой моделей для задач второго вида.

Современное состояние по решению рассматриваемых задач отражено в работах [4–20]. Модель MILP [4] используется для оптимизации распределения заданий по пакетам в целях последовательной их обработки на одном устройстве. Модели, рассматриваемые в [5, 6], позволяют осуществить распределение заданий по пакетам для параллельной их обработки на одном устройстве. Новизной модели [7] является введение заказов клиентов на обработку комплектов заданий. Идентификация эффективных решений по распределению заданий в пакеты реализуется с учетом сроков формирования заказов из комплектов, полученных в результате их обработки.

Исследования по построению моделей MILP, позволяющих определить лучший способ проведения операций с заданиями из пакетов, выполняемых на единственной машине, развиваются путем разработки полиномиальных алгоритмов поиска решений. Работа [8] посвящена разработке полиномиального алгоритма оптимизации составов пакетов заданий (ПЗ) и порядка их выполнения на одном приборе с учетом эффекта обучения. Эффект обучения предполагает увеличение времени выполнения заданий и времени переналадки прибора по мере реализации процесса их обработки. В пакеты задания объединяют, чтобы уменьшить общее время наладок прибора. Рассматриваемый в статье [9] полиномиальный алгоритм предусматривает оптимизацию решений путем: 1) формирования последовательности заданий с учетом директивных сроков; 2) разделения последовательности заданий по пакетам при анализе времени наладок прибора. Авторы [10] предлагают полиномиальный алгоритм включения заданий двух агентов в пакеты, для которых задается необходимое к выполнению их (заданий) количество. Составы пакетов формируются при условии совмести-

сти и несовместимости заданий. Сформирован векторный критерий с компонентами: 1) длительностью процесса выполнения заданий первого агента; 2) суммарным запаздыванием с окончанием выполнения заданий второго агента относительно директивных сроков.

В [11] рассматривается математическая модель MILP для совместного решения задач оптимизации распределения заданий, поступивших от разных заказчиков, по пакетам для их обработки и доставки в директивные сроки. Рассматривается двухприборная система.

В работе [12] модель MILP позволяет сформировать эффективные решения по объединению отдельных заданий в пакеты, которые выполняются на параллельных приборах в машинах для пакетной обработки (Batch Processing Machine, BPM). Время обработки заданий различно, наборы заданий не рассматриваются, переналадка приборов на выполнение заданий в пакетах не учитывается. Наряду с решением задачи параллельного пакетирования предложенная в [12] модель позволяет оптимизировать назначение заданий из пакетов на параллельные приборы BPM. При построении модели в [13] задания типизированы, в пакет включаются задания одного типа. Время наладки BPM постоянно и не зависит от последовательности, составы пакетов также постоянны. Порядок выполнения пакетов на BPM также не меняется. В модели использован подход с обратным планированием, который предусматривает формирование последовательности выполнения пакетов, начиная с последнего, окончание которого совпадает со сроком завершения действий со всеми заданиями. В результате сформирована нелинейная математическая модель распределения заданий по пакетам, которая не линеаризована. В силу значительного времени, затрачиваемого на получение результатов, задача имеет ограниченный размер.

Модель процесса осуществления операций с пакетами в потоковой системе, в которую включены BPM, при учете моментов времени поступления заданий получена в статье [14]. Авторы анализируют особенности процессов с одинаковыми значениями времени их выполнения на приборах, формулируют и доказывают предположения, на основе которых формулируют полиномиальный алгоритм оптимизации составов ПЗ.

Работа [15] является продолжением работы [13]. В ней также формируется нелинейная модель процесса выполнения ПЗ в системах с BPM. Линеаризация модели не выполняется.

Для идентификации лучших решений по распределению заданий по пакетам в системах смешанного типа разработаны модели MILP, рассмотренные в [16, 17]. Модели обеспечивают

идентификацию порядков проведения операций на машинах последовательной обработки, распределение заданий по пакетам для действий с ними на параллельных приборах в ВРМ.

Предложенная в [18] модель MILP позволяет оптимизировать составы пакетов, назначать ПЗ на определенные приборы не связанных машин, оптимизировать порядок выполнения пакетов на приборах.

Работа [19] также посвящена построению математической модели MILP оптимизации составов ПЗ, выполняемых в системах Flexible FlowShop, их назначению на приборы не связанных машин. Особенности модели MILP являются то, что:

- 1) задается количество частей, на которые должен быть разделен каждый набор заданий;
- 2) в каждой части набора количество заданий оптимизируется, и она назначается в пакет на определенный прибор в соответствующей позиции выполнения;
- 3) ПЗ могут быть назначены на разные приборы.

Модель MILP, предложенная в [20], оптимизирует отдельно пакеты на первой и второй стадиях с машинами последовательной обработки заданий (Job Processing Machine, JPM), а также размеры пакетов на третьей стадии с ВРМ. Размеры ПЗ на JPM одинаковы, а в пакеты на ВРМ входят задания разных типов.

Из проведенного анализа моделей и методов идентификации решений по объединению заданий в пакеты и по порядкам осуществления операций с ними в одномашинных и многомашинных системах может быть сделан вывод, что эти модели и алгоритмы реализуют распределение единичных заданий по пакетам. В этих моделях типизация заданий с точки зрения равных значений их временных характеристик не осуществляется. Это обуславливает значительное количество ограничений в моделях, значительное время поиска эффективных решений, малый размер решаемых задач. Требуется реализация альтернативного подхода к разработке моделей MILP, предусматривающего типизацию заданий в соответствии с указанными временными параметрами заданий. При его реализации возможно значительно сократить количество ограничений в моделях MILP, упростить их вид, уменьшить время получения результатов.

Для классификации решаемой задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС в соответствии с [21, 22] она может быть представлена в виде  $\alpha|\beta|\gamma$ , где  $\alpha$  — тип обрабатывающей системы;  $\beta$  — тип решаемой задачи (характеризует ее особенности);  $\gamma$  — вид критерия оптимизации для определения эффективных решений.

Рассматриваемая обрабатывающая система является конвейерной и с точки зрения общепринятой классификации — системой FlowShop. Тогда в качестве  $\alpha$  указывается  $F$ . Изучаемая в работе задача предусматривает определение эффективных решений по составам пакетов заданий (в общепринятой классификации — партий), а также расписаний их выполнения в КС. В этом случае в соответствии с [22] в качестве характеристики решаемой задачи указывается  $batch$ . Критерием, в соответствии с которым определяются эффективные решения по составам ПЗ и их последовательностям для проведения операций с ними на приборах КС, является момент времени окончания указанного процесса, обозначенный как  $C_{max}$ . Тогда рассматриваемая задача с точки зрения [21, 22] может быть охарактеризована следующим образом:  $F|batch|C_{max}$ .

Для построения моделей использованы следующие обозначения для индексов [1]:  $i$  — тип заданий;  $l$  — номер прибора;  $j$  — позиция пакета в последовательностях проведения операций с ними на приборах. Параметры, характеризующие систему и выполняемые задания [1]:  $I$  — количество типов заданий;  $L$  — количество приборов;  $J$  — количество позиций (соответствует количеству пакетов в последовательностях);  $t_{li}$  — длительности проведения на  $l$ -х приборах операций с заданиями  $i$ -х типов;  $t_{lk}^l$  — длительности проведения переналадок  $l$ -х приборов на осуществление операций с заданиями  $k$ -х типов;  $n^i$  — количество заданий  $i$ -го типа ( $i = 1, I$ ). Последовательности проведения операций на приборах с пакетами обозначены как  $\pi^l$  ( $l = 1, L$ ) ( $R$  — большое число). Также при построении моделей применены следующие характеристики процессов и соответствующие им обозначения:

- 1) для пакетов, находящихся в последовательностях  $\pi^l$  в  $j$ -х позициях ( $j = 1, J$ ), введены обозначения моментов времени начала проведения операций с ними  $q_{lj}$ ;
- 2) для задаваемых сроков окончания проведения операций с заданиями  $i$ -х типов в системе введены обозначения  $d_i$ ;
- 3) для окончания выполнения заданий  $i$ -х типов введены обозначения моментов времени  $g_i$ ;
- 4) для заданий  $i$ -х типов введены запаздывания с окончанием их выполнения относительно директивных сроков, обозначенные  $p_i$ .

В качестве решений выступают:

- 1) количество заданий, включаемых в пакеты в  $j$ -х позициях в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = 1, L$ ) (обозначено как  $m_{lj}$  ( $j = 1, J$ ));
- 2) типы заданий, включаемых в пакеты, занимающие  $j$ -е позиции в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = 1, L$ ) (обозначены как  $x_{ij}$ ;  $x_{ij} = 1$ , если задания в пакете в  $j$ -й позиции принадлежат  $i$ -му типу;  $x_{ij} = 0$  в противном случае).

**Математические модели MILP идентификации лучших решений по включению заданий в пакеты и по порядкам пакетов для проведения операций с ними в КС**

Разработка моделей MILP указанного вида осуществляется с точки зрения двух целей функционирования системы: 1) внутренней цели, предполагающей эффективное использование ресурсов; 2) внешней цели, предполагающей удовлетворение потребностей заказчиков, использующих результаты выполнения заданий. Достижение внутренней цели функционирования системы предусматривает минимизацию времени окончания процесса выполнения ПЗ в КС. Достижение внешней цели предусматривает минимизацию суммарного запаздывания окончания выполнения заданий в КС относительно директивных сроков. В соответствии с этим в качестве критериев оптимизации решений в моделях выступают: 1) время окончания процесса выполнения заданий в КС в составе пакетов; 2) общее запаздывание с окончанием обработки заданий относительно заданных для них сроков. Поэтому для первой модели в качестве критерия использовано время окончания процесса проведения операций с заданиями в КС  $C_{\max}$ .

Математическая модель, позволяющая идентифицировать эффективные решения по включению однотипных заданий в пакеты и по порядкам пакетов для проведения операций с ними на приборах КС, представляет собой совокупность выражений, интерпретируемых как критерий оптимизации и ограничения на множество решений.

Если пакет занимает ( $j = 1$ )-ю позицию в последовательности  $\pi^l$  их выполнения на ( $l = 1$ )-м приборе, то значение  $q_{11}$  определяется выражением

$$q_{11} \geq t_{ii}^1 x_{i1}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где  $t_{ii}^1$  – время первоначальной наладки ( $l = 1$ )-го прибора на осуществление операций с заданиями  $i$ -го типа, которые включены в пакет, занимающий ( $j = 1$ )-ю позицию в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) их выполнения на приборах КС.

Если пакет занимает  $j$ -ю позицию в последовательности  $\pi^l$  их выполнения на ( $l = 1$ )-м приборе, то значение  $q_{1j}$  вычисляется с использованием выражения

$$q_{1j} \geq q_{1j-1} + t_{1i} m_{j-1} x_{k,j-1} + t_{ik}^1 x_{k,j-1} x_{ij} \quad \text{при } j = \overline{2, J}, \quad i = \overline{1, I}, \quad k = \overline{1, I}, \quad i \neq k. \quad (2)$$

Если пакет занимает ( $j = 1$ )-ю позицию в последовательности  $\pi^l$  их выполнения на  $l$ -м приборе ( $l = \overline{2, L}$ ), то значение  $q_{l1}$  определяется выражением

$$q_{l1} \geq \max(t_{ii}^l x_{i1}, q_{l-1,1} + t_{l-1,i} m_1 x_{i1}) \quad \text{при } i = \overline{1, I}, \quad l = \overline{2, L}. \quad (3)$$

Если пакет занимает  $j$ -ю позицию в последовательности  $\pi^l$  их выполнения на  $l$ -м приборе ( $l = \overline{2, L}$ ), то значение  $q_{lj}$  вычисляется следующим образом:

$$q_{lj} \geq \max(q_{l-1,j} + t_{l-1,i} m_j x_{ij}; q_{l,j-1} + t_{lk} m_{j-1} x_{k,j-1} + t_{ki}^l x_{k,j-1} x_{ij}), \quad j = \overline{2, J}, \quad i = \overline{1, I}, \quad k = \overline{1, I}, \quad i \neq k, \quad l = \overline{2, L}. \quad (4)$$

Идентификация лучших решений по включению заданий одного типа в пакеты и по порядкам проведения операций с ними на приборах КС осуществляется при условии снижения времени окончания действий с пакетами на последнем  $L$ -м приборе. Для определения окончания выполнения разных пакетов в КС (на ее последнем  $L$ -м приборе) используется выражение  $q_{Lj} + t_{Li} m_j x_{ij}$  ( $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ ). Чтобы идентифицировать время окончания проведения операций со всеми пакетами в системе, использовано выражение

$$C_{\max} = \max_{i=1, I, j=1, J} (q_{L,j} + t_{L,i} m_j x_{ij}). \quad (5)$$

Определение составов пакетов осуществляется в соответствии со следующими предположениями:

1) количество заданий в пакете не может быть менее двух;

2) последовательности  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) пакетов для осуществления операций с ними на приборах КС являются одинаковыми.

В дополнение к введенным выражениям (1)–(5) сформированы выражения, ограничивающие множество допустимых решений задачи:

1) условия, определяющие возможность размещения в каждой  $j$ -й позиции ( $j = \overline{1, J}$ ) ПЗ только одного  $i$ -го типа ( $i = \overline{1, I}$ ):

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, J}; \quad (6)$$

2) условия, определяющие необходимость отличия типов заданий, включенных в пакеты в ( $j - 1$ )-й и  $j$ -й позициях в последовательностях  $\pi^l$  ( $l = \overline{1, L}$ ):

$$x_{i,j-1} + x_{i,j} \leq 1, \quad j = \overline{2, J}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (7)$$

3) условия, определяющие необходимость распределения всех заданий по пакетам:

$$\sum_{j=1}^J m_j x_{ij} = n^i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (8)$$

4) условия, определяющие значения  $q_{lj}$ :

$$q_{lj} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}; \quad (9)$$

5) условия, определяющие, что при включении однотипных заданий в пакет их количество не может быть менее двух:

$$m_j \geq 2, \quad j = \overline{1, J}; \quad (10)$$

6) условия, определяющие значения переменных  $x_{ij}$  и  $m_j$ :

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, m_j - \text{целые}, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \quad (11)$$

Идентификация лучших решений по включению однотипных заданий в пакеты и по порядкам проведения операций с ними на приборах КС осуществляется с учетом требования минимизации времени окончания процессов выполнения заданий. Тогда математическая модель оптимизации решений имеет следующий итоговый вид:

1) критерий оптимизации  $\min C_{\max}$ , где

$$C_{\max} = \max_{i=1, I, j=1, J} (q_{L,j} + t_{L,i} m_j x_{ij}); \quad (12)$$

2) выражения, ограничивающие множество решений:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, J}; \quad (13)$$

$$x_{i,j-1} + x_{i,j} \leq 1, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{2, J}; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J m_j x_{ij} = n^i, \quad i = \overline{1, I}; \quad (15)$$

$$q_{11} \geq t_{11}^1 x_{11}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (16)$$

$$q_{1j} \geq q_{1,j-1} + t_{1i} m_{j-1} x_{i,j-1} + t_{ik}^1 x_{k,j-1} x_{ij}, \quad j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k; \quad (17)$$

$$q_{l1} \geq \max(t_{ii}^l x_{i1}, q_{l-1,1} + t_{l-1,i} m_1 x_{i1}), \quad i = \overline{1, I}; \quad (18)$$

$$q_{lj} \geq \max(q_{l-1,j} + t_{l-1,i} m_j x_{ij};$$

$$q_{l,j-1} + t_{lk} m_{j-1} x_{k,j-1} + t_{ki}^l x_{k,j-1} x_{ij}), \quad j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (19)$$

$$q_{lj} \geq 0, \quad j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}; x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}; m_j > 2, m_j - \text{целое}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (20)$$

Модель (12)–(20) является нелинейной. С целью уменьшить длительности интервалов времени получения решений выполнена ее линейризация. В первую очередь нелинейным является критерий (12). Общий вид задачи определения эффективных решений по включению однотипных заданий в пакеты и по порядкам пакетов для проведения операций с ними на приборах КС следующий:

$$\min \max_{i=1, I, j=1, J} (q_{L,j} + t_{L,i} m_j x_{ij}).$$

Переменная  $C_{\max}$  используется для линейризации выражения (12). Это выражение интерпретируется как целевая функция. Для интерпретации введенного выражения с точки зрения использования в нем переменной  $C_{\max}$  введена система ограничений вида [23]

$$C_{\max} \geq q_{L,j} + t_{L,i} m_j x_{ij}, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}.$$

В полученной модели выражения (15), (17)–(19) являются нелинейными. Устранение нелинейности этих выражений обеспечивается введением дополнительных переменных и ограничений, определяющих корректность замены ими произведений. Введение дополнительных переменных реализуется при условии, что для  $m_j$  выполняется условие вида  $2 \leq m_j \leq u_j$ , где  $u_j$  – максимальное число заданий в пакете. В соответствии с условием, определяющим, что количество заданий каждого  $i$ -го типа ( $i = \overline{1, I}$ ) в их наборах является одинаковым ( $n^1 = n^2 = \dots = n^I = n$ ), значения  $u_j$  вычисляются с использованием выражения вида  $u_j = n - 2$  (при учете требования к минимальному количеству заданий в пакетах, равному двум).

В целях линейризации (18) введены переменные  $r_{1i}$  ( $i = \overline{1, I}$ ):  $r_{1i} = m_1 x_{i1}$ , корректность их применения обеспечивается заданием ограничений вида [23]

$$r_{1i} \leq m_1; r_{1i} \leq u_1 x_{i1}; r_{1i} \geq m_1 + u_1 (x_{i1} - 1); r_{1i} \geq 0; u_1 = (n - 2), \quad i = \overline{1, I}.$$

Для линейризации (15), (17), (19) введены переменные  $r_{ji}$  ( $j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}$ ):  $r_{ji} = m_j x_{ij}$ , корректность их применения обеспечивается ограничениями [23]

$$r_{ji} \leq m_j; r_{ji} \leq u_j x_{ij}; r_{ji} \geq m_j + u_j (x_{ij} - 1); r_{ji} \geq 0; u_j = (n - 2), \quad j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}.$$

Также в целях линейризации (17), (19) в рассмотрение введены переменные  $y_{k,j-1,i,j}$ :  $y_{k,j-1,i,j} = x_{k,j-1} x_{ij}$  ( $j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k$ ). Для корректной замены произведений  $x_{k,j-1} x_{ij}$  на переменные  $y_{k,j-1,i,j}$  введены ограничения вида [23]

$$\begin{aligned}
 & y_{k,j-1,i,j} \leq x_{k,j-1}; \quad y_{k,j-1,i,j} \leq x_{ij}; \\
 & y_{k,j-1,i,j} \geq x_{k,j-1} + x_{ij} - 1, y_{k,j-1,i,j} \in \{0, 1\}, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k.
 \end{aligned}$$

В то же время нелинейность выражений (18), (19) является следствием использования в них операции  $\max$ . Применение для их линейаризации способа, предложенного в [23, 24], не позволило значительно увеличить производительность вычислений при поиске оптимального решения по сравнению с моделью (12)–(20). Для линейаризации выражения (18) в рассмотрение введены бинарные переменные  $v_{l1}$  ( $l = \overline{2, L}$ ):  $v_{l1} = 1$ , если переналадка  $l$ -го прибора на осуществление операций с заданиями  $i$ -го типа в пакете в ( $j = 1$ )-й позиции в  $\pi^l$  на этом приборе завершилась раньше, чем операции с ним на ( $l - 1$ )-м приборе;  $v_{l1} = 0$  в противном случае. Тогда линейаризация ограничений (18) проводится путем введения выражений

$$\begin{aligned}
 & -\left[(q_{l-1,1} + t_{l-1,i}m_1x_{i1}) - t_{ii}^l x_{i1}\right] + Rv_{l1} \geq 0, \\
 & l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[(q_{l-1,1} + t_{l-1,i}m_1x_{i1}) - t_{ii}^l x_{i1}\right] + \\
 & + R(1 - v_{l1}) > 0, l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & q_{l1} \geq t_{ii}^l x_{i1} - Rv_{l1}; \\
 & q_{l1} \geq \left[(q_{l-1,1} + t_{l-1,i}m_1x_{i1}) - t_{ii}^l x_{i1}\right] - R(1 - v_{l1}), \\
 & l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$v_{l1} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}. \quad (24)$$

Для линейаризации ограничений (19) в рассмотрение введены переменные  $w_{lj}$  ( $l = \overline{2, L}, j = \overline{2, J}$ ), для которых  $w_{lj} = 1$  в случае, если выполнение ПЗ в  $j$ -й позиции на ( $l - 1$ )-м приборе в  $\pi^{l-1}$  завершилось ранее, чем выполнение ПЗ в ( $j - 1$ )-й позиции в  $\pi^l$  на  $l$ -м приборе;  $w_{lj} = 0$  в противном случае. Линейаризация ограничений (19) реализуется путем введения в рассмотрение следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 & -\left[(q_{l,j-1} + t_{lk}m_{j-1}x_{k,j-1} + t_{ki}^l x_{k,j-1}x_{ij}) - \right. \\
 & \left. - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}m_jx_{ij})\right] + R w_{lj} \geq 0, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[(q_{l,j-1} + t_{lk}m_{j-1}x_{k,j-1} + t_{ki}^l x_{k,j-1}x_{ij}) - \right. \\
 & \left. - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}m_jx_{ij})\right] + R(1 - w_{lj}) > 0, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & q_{l,j} \geq (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}m_jx_{ij}) - R w_{lj}, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, l = \overline{2, L}; \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & q_{lj} \geq (q_{l,j-1} + t_{lk}m_{j-1}x_{k,j-1} + t_{ki}^l x_{k,j-1}x_{ij}) - \\
 & - R(1 - w_{lj}), \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (28) \\
 & w_{lj} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}, j = \overline{2, J}. \quad (29)
 \end{aligned}$$

С учетом переменных  $v_{l1}$  ( $l = \overline{2, L}$ ),  $w_{lj}$  ( $l = \overline{2, L}, j = \overline{2, J}$ ), ограничений (21)–(29), переменных  $r_{ji}$  ( $j = \overline{1, J}, i = \overline{1, I}$ ),  $y_{k,j-1,i,j}$  ( $j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k$ ), соответствующих им ограничений получен итоговый вид модели MILP:

1) критерий оптимизации

$$\min C_{\max}; \quad (30)$$

2) выражения, ограничивающие множество решений:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, j = \overline{1, J}; \quad \sum_{j=1}^J r_{ji} = n^i, i = \overline{1, I}; \quad (31)$$

$$x_{i,j-1} + x_{i,j} \leq 1, i = \overline{1, I}, j = \overline{2, J}; \quad (32)$$

$$q_{l1} \geq t_{ii}^1 x_{i1}, i = \overline{1, I}; \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 & q_{1j} \geq q_{1,j-1} + t_{1k}r_{j-1,k} + t_{ki}^1 y_{k,j-1,i,j}, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k; \quad (34)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\left[(q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - t_{ii}^l x_{i1}\right] + Rv_{l1} \geq 0; \\
 & \left[(q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - t_{ii}^l x_{i1}\right] + R(1 - v_{l1}) > 0, \\
 & l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (35)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & q_{l1} \geq t_{ii}^l x_{i1} - Rv_{l1}; \\
 & q_{l1} \geq (q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - R(1 - v_{l1}); \\
 & l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$v_{l1} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}; \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
 & r_{1i} \leq m_1; \quad r_{1i} \leq u_1 x_{i1}; \quad r_{1i} \geq m_1 + u_1 (x_{i1} - 1); \\
 & r_{1i} \geq 0; \quad u_1 = (n - 2), i = \overline{1, I}; \quad (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\left[(q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l y_{k,j-1,i,j}) - \right. \\
 & \left. - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji})\right] + R w_{lj} \geq 0, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[(q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l y_{k,j-1,i,j}) - \right. \\
 & \left. - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji})\right] + R(1 - w_{lj}) > 0, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (40)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & q_{l-1,j} \geq (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji}) - R w_{lj}, \\
 & j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, l = \overline{2, L}; \quad (41)
 \end{aligned}$$

$$q_{lj} \geq (q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l y_{k,j-1,i,j}) - R(1 - w_{lj}),$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (42)$$

$$w_{lj} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}, j = \overline{2, J}; \quad (43)$$

$$r_{ji} \leq m_j; r_{ji} \leq u_j x_{ij}; r_{ji} \geq m_j + u_j(x_{ij} - 1);$$

$$r_{ji} \geq 0; u_j = (n - 2), j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}; \quad (44)$$

$$y_{k,j-1,i,j} \leq x_{k,j-1}; y_{k,j-1,i,j} \leq x_{ij};$$

$$y_{k,j-1,i,j} \geq x_{k,j-1} + x_{ij} - 1, y_{k,j-1,i,j} \in \{0, 1\},$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k; \quad (45)$$

$$C_{\max} \geq q_{Lj} + t_{Li}r_{ji}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}; \quad (46)$$

$$q_{lj} \geq 0, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}; \quad (47)$$

$$m_j \geq 2, m_j - \text{целое}, j = \overline{1, J}; \quad (48)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \quad (49)$$

Математическая модель смешанного целочисленного программирования второго вида сформирована в предположении, что для наборов заданий заданы сроки окончания их выполнения. Тогда типизация заданий осуществляется с учетом дополнительного параметра, характеризующего сроки окончания проведения операций с ними в КС. В качестве критерия оптимизации решений во второй модели использовано суммарное запаздывание  $G$ . Для определения запаздываний окончания выполнения заданий  $i$ -х типов относительно директивных сроков введены переменные  $z_i$  ( $i = \overline{1, I}$ ):  $z_i = 1$ , если моменты времени  $g_i$  окончания выполнения заданий  $i$ -го типа превышают заданные сроки  $d_i$  ( $g_i - d_i > 0$ );  $z_i = 0$  в противном случае.

Моменты  $g_i$  времени окончания проведения в системе операций со всеми заданиями  $i$ -х типов, включенными в различные пакеты, определяются с использованием выражений вида  $g_i \geq (q_{Lj} + t_{Li}m_j x_{ij})$  ( $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ ), которые с учетом переменных  $r_{ji}$  преобразованы следующим образом:  $g_i \geq (q_{Lj} + t_{Li}r_{ji})$  ( $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ ). Для определения запаздываний  $p_i$  с окончанием выполнения наборов заданий  $i$ -х типов относительно сроков  $d_i$  введены индикаторные переменные  $z_i$  ( $i = \overline{1, I}$ ), с учетом которых значения  $p_i$  определяются выражениями

$$-(g_i - d_i) + Rz_i \geq 0, (g_i - d_i) + R(1 - z_i) \geq 0,$$

$$p_i \geq (g_i - d_i) - R(1 - z_i), p_i \geq -Rz_i, z_i \in \{0, 1\},$$

где  $i = \overline{1, I}$ .

Выражение для вычисления значений критерия  $G$  получено в виде  $G = \sum_{i=1}^I p_i$ . Модель (30)–(49)

модифицирована и получена в виде:

1) критерий оптимизации

$$\min G; \quad (50)$$

2) выражения, ограничивающие множество решений задачи:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, j = \overline{1, J}; \sum_{j=1}^J r_{ji} = n^i, i = \overline{1, I}; \quad (51)$$

$$x_{i,j-1} + x_{i,j} \leq 1, i = \overline{1, I}, j = \overline{2, J}; \quad (52)$$

$$q_{11} \geq t_{i1}^1 x_{i1}, i = \overline{1, I}; \quad (53)$$

$$q_{1j} \geq q_{1,j-1} + t_{1k}r_{j-1,k} + t_{ki}^1 y_{k,j-1,i,j},$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k; \quad (54)$$

$$-\left[ (q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - t_{ii}^l x_{i1} \right] + Rv_{l1} \geq 0;$$

$$\left[ (q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - t_{ii}^l x_{i1} \right] + R(1 - v_{l1}) > 0; \quad (55)$$

$$l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I};$$

$$q_{l1} \geq t_{ii}^l x_{i1} - Rv_{l1};$$

$$q_{l1} \geq (q_{l-1,1} + t_{l-1,i}r_{1i}) - R(1 - v_{l1}),$$

$$l = \overline{2, L}, i = \overline{1, I}; \quad (56)$$

$$v_{l1} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}; \quad (57)$$

$$r_{1i} \leq m_1; r_{1i} \leq u_1 x_{i1}; r_{1i} \geq m_1 + u_1(x_{i1} - 1);$$

$$r_{1i} \geq 0; u_1 = (n - 2), i = \overline{1, I}; \quad (58)$$

$$-\left[ (q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l y_{k,j-1,i,j}) - \right.$$

$$\left. - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji}) \right] + R w_{lj} \geq 0,$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (59)$$

$$\left[ (q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l x_{k,j-1} x_{ij}) - (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji}) \right] +$$

$$+ R(1 - w_{lj}) > 0,$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (60)$$

$$q_{l-1,j} \geq (q_{l-1,j} + t_{l-1,i}r_{ji}) - R w_{lj},$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, l = \overline{2, L}; \quad (61)$$

$$q_{lj} \geq (q_{l,j-1} + t_{lk}r_{j-1,k} + t_{ki}^l y_{k,j-1,i,j}) - R(1 - w_{lj}),$$

$$j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k, l = \overline{2, L}; \quad (62)$$

$$w_{lj} \in \{0, 1\}, l = \overline{2, L}, j = \overline{2, J}; \quad (63)$$

$$g_i \geq (q_{Lj} + t_{Li}r_{ji}), i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}; \quad (64)$$

$$\begin{aligned}
 -(g_i - d_i) + Rz_i &\geq 0, (g_i - d_i) + R(1 - z_i) \geq 0, \\
 p_i &\geq (g_i - d_i) - R(1 - z_i), \\
 p_i &\geq -Rz_i, z_i \in \{0, 1\}, i = \overline{1, I}; \quad (65)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{ji} &\leq m_j; r_{ji} \leq u_j x_{ij}; r_{ji} \geq m_j + u_j(x_{ij} - 1); \\
 r_{ji} &\geq 0; u_j = (n - 2), j = \overline{2, J}, i = \overline{1, I}; \quad (66)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_{k,j-1,i,j} &\leq x_{k,j-1}; y_{k,j-1,i,j} \leq x_{ij}; \\
 y_{k,j-1,i,j} &\geq x_{k,j-1} + x_{ij} - 1, y_{k,j-1,i,j} \in \{0, 1\}, \\
 j &= \overline{2, J}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, I}, i \neq k; \quad (67)
 \end{aligned}$$

$$G = \sum_{i=1}^I p_i; q_{lj} \geq 0, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}; \quad (68)$$

$$m_j \geq 2, m_j - \text{целое}, j = \overline{1, J}; \quad (69)$$

$$g_i \geq 0, p_i \geq 0, z_i \geq 0, i = \overline{1, I}; \quad (70)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \quad (71)$$

**Исследование применения моделей MILP для идентификации эффективных решений по включению однотипных заданий в пакеты и по порядкам пакетов для проведения операций с ними на приборах КС**

Исследование моделей проводится с целью удостовериться в том, что рассматриваемый подход, предусматривающий типизацию заданий в соответствии со значениями их временных параметров, позволяет получить решения, являющиеся более эффективными, чем фиксированные пакеты, а также идентифицировать степень увеличения эффективности получаемых решений. Применимость моделей MILP исследована путем решения ряда рассматриваемых задач с различными значениями параметров  $t_{i'}$  и  $t_{i''}$ . Значения этих параметров такие, что  $\max(t_{i'}/\min(t_{i''})) \in \{4, 8\}$  и  $\max(t_{i''}^l/\min(t_{i''}^l)) \in \{2, 4, 8\}$ . Указанные отношения являются одинаковыми для всех приборов. Для других параметров задач заданы следующие значения:  $n = 5, n^i \in \{8, 12, 16\}, L = 5$ . Результатами исследований первой модели является функциональная связь отношения  $C_{с.в.п} = (C_{\max}^{\text{фикс}} - C_{\max}^{\text{о.с.п}}) / C_{\max}^{\text{фикс}}$  с параметрами задачи ( $C_{с.в.п}$  – степень снижения значений моментов времени окончания выполнения действий с пакетами – повышение эффективности решений при оптимизации;  $C_{\max}^{\text{фикс}}$  – значение критерия для фиксированных пакетов;  $C_{\max}^{\text{о.с.п}}$  – значение критерия при оптимизации составов пакетов с использованием первой из предложенных моделей). Фиксированными являются пакеты, содержащие все задания  $i$ -го типа ( $n$  фик-

сированных пакетов). Полученные зависимости  $C_{с.в.п}$  от параметров задачи представлены на рис. 1.

Для второй модели результатом исследований является функциональная связь отношения  $G_{с.о.з} = (G^{\text{фикс}} - G^{\text{о.с.п}}) / G^{\text{фикс}}$  от параметров задачи ( $G_{с.о.з}$  – степень снижения общего запаздывания – повышение эффективности решений при оптимизации;  $G^{\text{фикс}}$  – значение критерия  $G$  для фиксированных пакетов;  $G^{\text{о.с.п}}$  – значение критерия  $G$  при оптимизации составов пакетов). При исследовании модели MILP второго вида для задач с определенными выше значениями параметров заданы сроки  $d_i$  окончания проведения операций с наборами, которые представлены в таблице. Полученные зависимости  $G_{с.о.з}$  от параметров задачи показаны на рис. 2.

В соответствии с представленными на рис. 1 зависимостями степени роста эффективности решений по включению однотипных заданий в пакеты в сравнении с фиксированными пакетами сделаны следующие выводы, касающиеся процесса проведения операций с ними в КС:

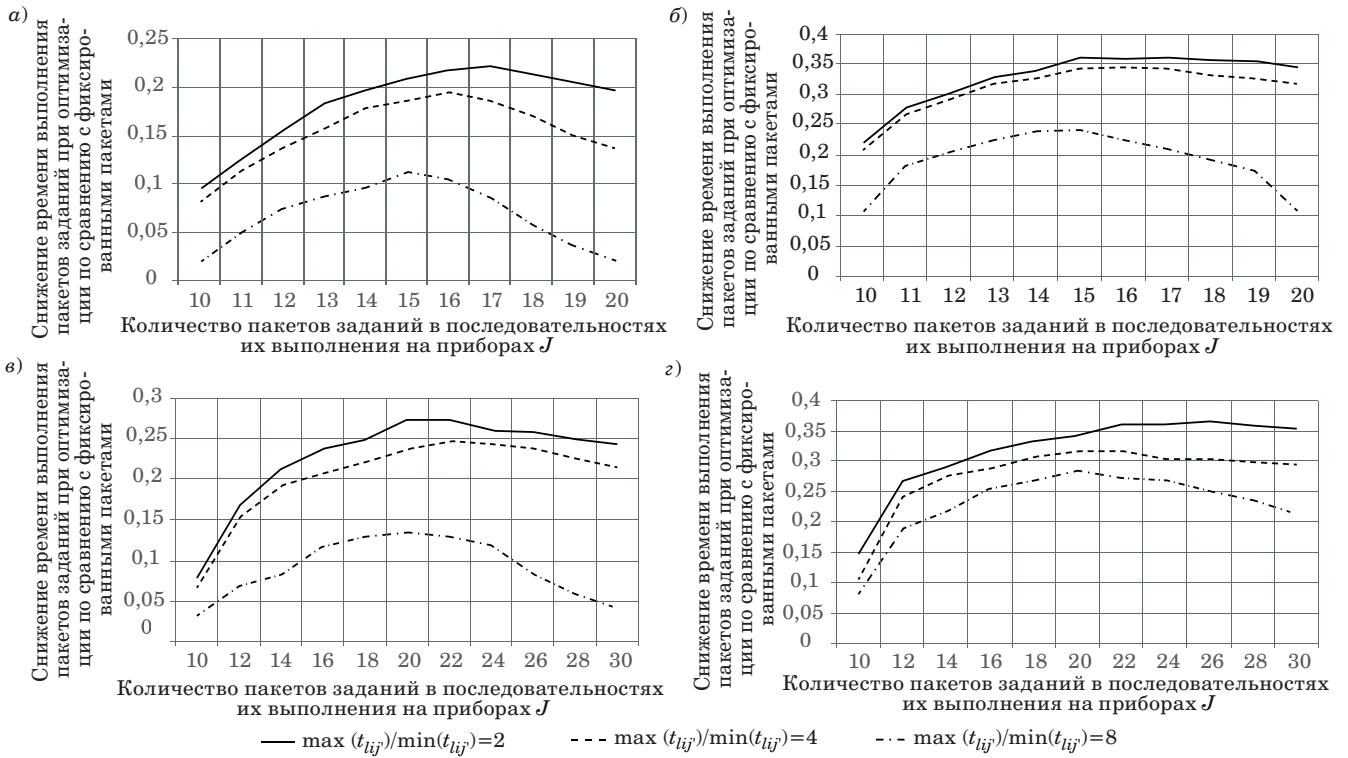
1) при росте неоднородности времени проведения операций на приборах с заданиями разных типов фиксируется повышение эффективности решений (при существенных значениях отношения  $\max(t_{i'})/\min(t_{i'})$  оптимизация составов ПЗ обуславливает большую эффективность проведения операций с пакетами на приборах); при увеличении неоднородности времени выполнения заданий оптимизация составов пакетов обеспечивает большую эффективность процесса осуществления операций с ними на приборах;

2) при неизменных значениях степени неоднородности времени выполнения заданий разных типов увеличение неоднородности вре-

■ Значения директивных сроков окончания выполнения наборов заданий для задач оптимизации составов пакетов и расписаний

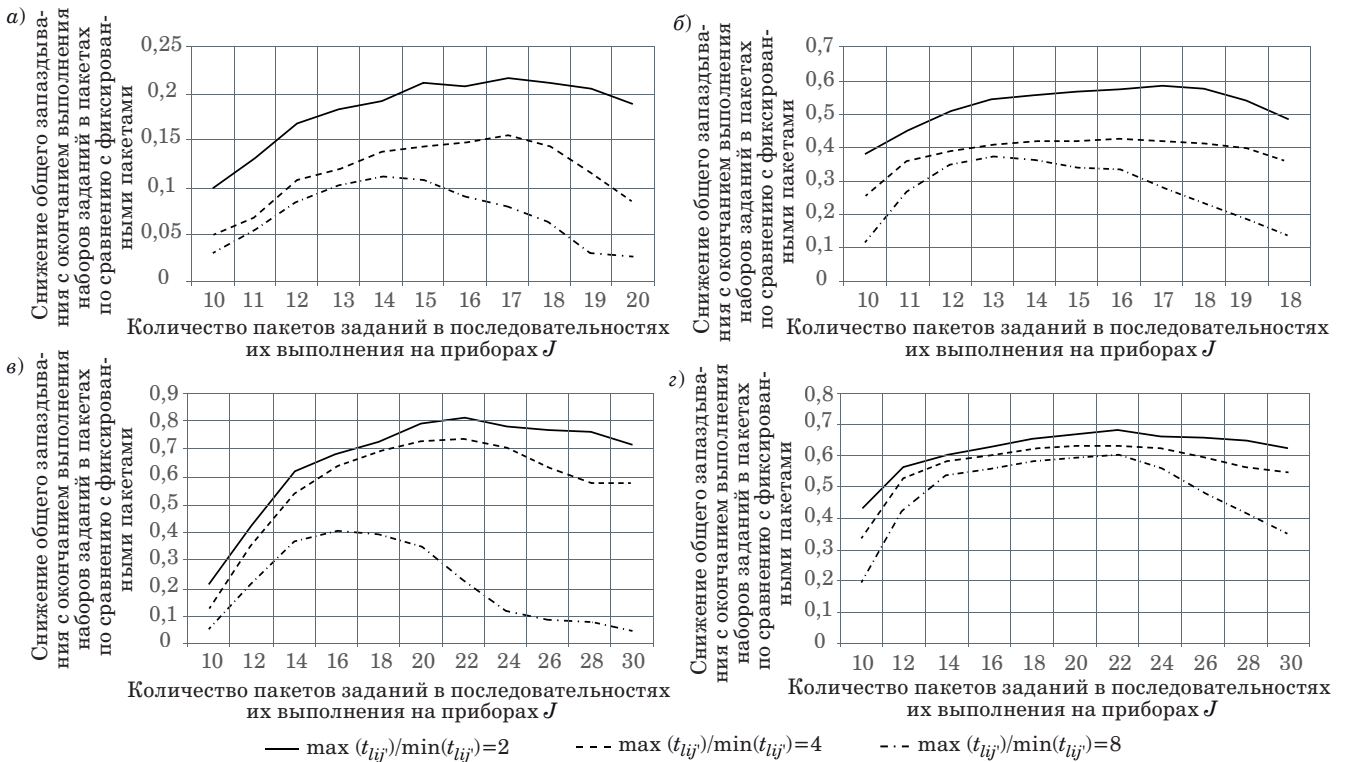
■ The values of the directive deadlines for completing task sets for optimization tasks of package compositions and schedules

$n^i$	$\max(t_{i'})/\min(t_{i'})$	$\max(t_{i''}^l)/\min(t_{i''}^l)$	$d_i (i = \overline{1, 5})$
8	4	2, 4	40, 80, 80, 120, 160
		8	80, 80, 120, 160, 200
	8	2, 4	80, 120, 160, 200, 240
		8	120, 160, 200, 240, 280
12	4	2, 4	40, 80, 80, 120, 160
		8	80, 80, 120, 160, 200
	8	2, 4	80, 120, 160, 200, 240
		8	120, 160, 200, 240, 280



■ **Рис. 1.** Уменьшение времени выполнения ПЗ при оптимизации их составов: а –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; б –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$ ; в –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; з –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$

■ **Fig. 1.** Reducing the execution time of packages while optimizing their compositions: а –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; б –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$ ; в –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; з –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$



■ **Рис. 2.** Уменьшение запаздывания окончания выполнения ПЗ при оптимизации составов: а –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; б –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$ ; в –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; з –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$

■ **Fig. 2.** Reducing the delay in the completion of packages when optimizing compositions: а –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; б –  $n^i = 8, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$ ; в –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 4$ ; з –  $n^i = 12, \max(t_{i'})/\min(t_{i'}) = 8$



мени переналадок приборов приводит к снижению эффективности оптимизации процессов выполнения ПЗ в КС; это обусловливается большими простоями, являющимися следствием длительных переналадок отдельных приборов; однако даже при больших значениях неоднородностей времени переналадок приборов оптимизация составов пакетов обеспечивает большую эффективность процессов выполнения пакетов в КС.

Зависимости степени роста эффективности решений по включению однотипных заданий в пакеты в сравнении с фиксированными пакетами, представленные на рис. 2, позволили сделать выводы, касающиеся процесса проведения операций с ними в КС (с учетом директивных сроков):

1) при росте неоднородности времени проведения операций на приборах с заданиями разных типов фиксируется повышение эффективности решений по включению заданий в пакеты в большей степени по сравнению с первой задачей;

2) увеличение количества заданий каждого типа обуславливает более значительный рост эффективности процессов их выполнения в КС по сравнению с первой задачей (рост от 0,23 до 0,4 для второй задачи по сравнению с ростом от 0,2 до 0,27 для первой задачи).

## Заключение

Современные математические модели МІLP и полиномиальные алгоритмы оптимизации расписаний выполнения заданий, входящих в наборы, предусматривают реализацию их распре-

деления по пакетам, а не оптимизацию составов пакетов однотипных заданий. Это обуславливает сложный вид моделей и ограниченный размер задач. Разработаны две модели смешанного целочисленного нелинейного программирования, позволяющие идентифицировать лучшие решения по включению заданий в пакеты (по определению количества однотипных заданий в пакетах) при учете времени завершения процесса проведения операций с пакетами и запаздывания с окончанием выполнения пакетов. Полученные модели линейризованы введением дополнительных переменных и выражений, ограничивающих множества решений, обуславливающих возможность их использования в моделях. Предложен способ исключения операций в сформированных нелинейных моделях путем введения дополнительных переменных и соответствующих им ограничений. Также предложен способ определения запаздываний с окончанием проведения операций с пакетами в системе по сравнению со сроками, которые заданы для каждого типа заданий. Способ определения запаздываний также предполагает введение бинарных переменных и соответствующих им ограничений. Итогом линейризирующих преобразований являются две математические модели МІLP, позволяющие определять эффективные решения по включению однотипных заданий в пакеты. Для исследований задач оптимизации с использованием предложенных моделей разработано приложение в пакете IBM ILOG CPLEX. Реализация подхода, связанного с типизацией заданий при разработке моделей МІLP, позволила увеличить их количество и сократить время получения результатов.

## Литература

1. Кротов К. В. Комплексный метод определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах. *Вычислительные технологии*, 2018, т. 23, № 3, с. 58–76.
2. Кротов К. В. Математическая модель и алгоритм метода ветвей и границ для оптимизации решений по составам пакетов в многостадийных системах. *Информатика и автоматизация*, 2022, т. 21, № 1, с. 5–40.
3. Кротов К. В. Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 2, с. 15–26. doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26, EDN: WWXRRW
4. Suppiah Ya., Omar M. K. A hybrid tabu search for batching and sequencing decisions in a single machine environment. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 78, pp. 135–147.
5. Trindade R. S., Bassi de Araujo O. C., Fampa M. Arc-flow approach for single batch-processing machine scheduling. *Computer & Operation Research*, 2021, vol. 134, Article 105394. doi:10.1016/j.cor.2021.105394, EDN: RUTXCE
6. Yang F., Davari M., Wei W., Hermans B., Leus R. Scheduling a single parallel-batching machine with non-identical job sizes and incompatible job families. *European Journal of Operational Research*, 2022, vol. 303, no. 3–4, pp. 602–615. doi:10.1016/j.ejor.2022.03.027
7. Ogun B., Alabas-Uslu Ç. Mathematical models for a batch scheduling problem to minimize earliness and tardiness. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 390–405. doi:10.3926/jiem.2541, EDN: YJFIVF
8. Pei J., Cheng B., Liu X., Pardalos P. M., Kong M. Single-machine and parallel-machine serial-batching

- scheduling problems with position-based learning effect and linear setup time. *Annals of Operations Research*, 2019, vol. 272, no. 1-2, pp. 217–241. doi:10.1007/s10479-017-2481-8, EDN: VBVGZU
9. **Wu W., Tangb L., Pizzuti A.** Robust scheduling for minimizing maximum lateness on a serial-batch processing machine. *Information Processing Letters*, 2024, no. 186, Article 106473. doi:10.1016/j.ipl.2024.106473
  10. **Li Sh., Li M., Khan M. I.** Algorithms for two-agent unbounded serial-batch scheduling with makespan and maximum lateness objectives. *Networks and Heterogeneous Media*, 2023, vol. 18, iss. 4, pp. 1678–1691. doi:10.3934/nhm.2023073, EDN: LTKVGD
  11. **Rostami M., Shad S.** A hybrid bee algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 2020, vol. 5, iss. 1, pp. 137–164. doi:10.22070/jqepo.2020.5317.1143
  12. **Matin H. N. Z., Salmasi N., Shahvari O.** Makespan minimization in flowshop batch processing problem with different batch compositions on machines. *International Journal of Production Economics*, 2017, vol. 193, pp. 832–844. doi:10.1016/j.ijpe.2017.09.015, EDN: VPBMXR
  13. **Hidayat N. P., Oktaviani T. D., Halim A. H.** Multiple item batch scheduling model on a batch processor to minimize total actual flowtime parts through the shop. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, May 2020, vol. 830(4), Article 042007. doi:10.1088/1757-899x/830/4/042007
  14. **Hertrich Ch., Weiß Ch., Ackermann H., Heydrich S., Krumke S. O.** Scheduling a proportionate flow shop of batching machines. *Journal of Scheduling*, 2020, vol. 23, no. 5, pp. 575–593. doi:10.1007/s10951-020-00667-2, EDN: SHXFJR
  15. **Halim A. H., Hidayat N. P., Aribowo W.** Single item batch-scheduling model for a flow shop with m batch-processing machines to minimize total actual flow time. *International Journal of Technology*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 816–826. doi:10.14716/ijtech.v13i4.4869, EDN: YPLIBH
  16. **Zhang Y., Zhou Z., Liu J.** The production scheduling problem in a multi-page invoice printing system. *Computer & Operation Research*, 2010, vol. 37, no. 10, pp. 1814–1821. doi:10.1016/j.cor.2010.01.014, EDN: XXDRJD
  17. **Mauluddin Y.** Three-stage flow-shop scheduling model with batch processing machine and discrete processing machine. *3rd Annual Applied Sciences and Engineering Conference AASEC 2018. Series: MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 197, Article 14002. doi:10.1051/mateconf/201819714002
  18. **Shahvari O., Logendran R.** Hybrid flow shop batching and scheduling with a bi-criteria objective. *International Journal Production Economics*, 2016, no. 179, pp. 239–258. doi:10.1016/j.ijpe.2016.06.005, EDN: XZDKUD
  19. **Wang S., Kurz M., Mason S., Rashidi E.** Two-stage hybrid flow shop batching and lot streaming with variable sublots and sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, no. 22, pp. 6893–6907. doi:10.1080/00207543.2019.1571251, EDN: DBEBPS
  20. **Suryadhini P. P., Sukoyo S., Suprayogi S., Halim A. H.** A batch scheduling model for a three-stage flow shop with job and batch processors considering a sampling inspection to minimize expected total actual flow time. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 520–537. doi:10.3926/jiem.3438, EDN: VFMZBT
  21. **Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G., Shmoys D. B.** Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. *Department of Operations Research, Statistics, and System Theory*, 1989, vol. R 8909, pp. 1–70.
  22. **Ковалев М. М.** *Модели и методы календарного планирования: курс лекций.* Минск, Изд-во БГУ, 2004. 63 с.
  23. **Asghari M., Fathollahi-Fard A. M., Mirzapour Al-e-hashem S. M. J., Dulebenets M. A.** Transformation and linearization techniques in optimization: A state-of-the-art survey. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 2, Article 283. doi:10.3390/math10020283, EDN: ABRVQM
  24. **Mohammadi S., Mirzapour Al-e-hashem S. M. J., Rekik Y.** An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: A case study from a furniture manufacturing company. *International Journal of Production Economics*, 2019, vol. 219, iss. 1, pp. 347–359. doi:10.1016/j.ijpe.2019.05.017

UDC 004.453

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-46-57

EDN: EFCACX

### Models of mixed integer linear programming for optimizing the inclusion of tasks in packages and the order of operations with them in pipeline systems

K. V. Krotov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-9670-6141, krotov\_k1@mail.ru<sup>a</sup>Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

**Introduction:** The identification of effective execution schedules in pipeline systems for sets of the same type of tasks provides for the search for the best solutions for including tasks from these sets in packages and the best solutions according to the order of packages for performing operations with them on the devices of these systems. With a small size of the tasks, it is possible to solve them by constructing mathematical models of mixed integer linear programming. **Purpose:** To develop mathematical models of mixed integer

linear programming that allow determining the best solutions for including the same type of tasks from sets into packages and in the order of packages for performing operations with them in pipeline systems. **Results:** The development of mathematical models of this type is based on an approach related to the typing of tasks. In accordance with this approach, tasks with equal duration values for their execution on the devices of conveyor systems and with equal duration values for the changeover of devices for operations with them belong to one type. Based on this approach, mathematical models of mixed integer nonlinear programming have been developed, which make it possible to include tasks from sets into packages and optimize their orders for the implementation of operations with them in pipeline systems. The optimization conditions are: minimization of the total time for completing task packages on pipeline system devices; minimization of the total delay with the completion of task sets compared to the specified time limits for them. The resulting models are linearized by introducing additional variables and corresponding constraints. A method for linearization of the operation of determining the maximum of two values is proposed, which provides for the introduction of indicator variables and allowed to increase computing performance. In order to verify the presented models, an application has been developed in the IBM ILOG CPLEX environment. With its application, studies have been conducted to optimize the composition of task packages and schedules for their execution for various sets of parameter values for the tasks of finding effective solutions. **Practical relevance:** The obtained results showed the effectiveness of the developed models in solving optimization problems in the considered formulation. The use of the proposed mathematical models makes it possible to increase the degree of use of the resources of various types of computer systems when implementing production or computing processes in them.

**Keywords** — pipeline systems, task packages, schedules, models of mixed integer linear programming.

**For citation:** Krotov K. V. Models of mixed integer linear programming for optimizing the inclusion of tasks in packages and the order of operations with them in pipeline systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 46–57 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-46-57, EDN: EFCACX

## References

- Krotov K. V. The complex method for determining effective solutions for data batch sizes and processing schedules in conveyor systems. *Computing Technologies*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 58–76 (In Russian).
- Krotov K. V. Mathematical model and algorithm of branch and boundary method for optimizing solutions for package compositions in multi-stage systems. *Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 5–40 (In Russian). doi:10.15622/ia.2022.21.1
- Krotov K. V. A branch and bound algorithm for the optimization of batch scheduling in pipeline systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 2, pp. 15–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-2-15-26, EDN: WWXRRW
- Suppiah Ya., Omar M. K. A hybrid tabu search for batching and sequencing decisions in a single machine environment. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 78, pp. 135–147.
- Trindade R. S., Bassi de Araujo O. C., Fampa M. Arc-flow approach for single batch-processing machine scheduling. *Computer & Operation Research*, 2021, vol. 134, Article 105394. doi:10.1016/j.cor.2021.105394, EDN: RUTXCE
- Yang F., Davari M., Wei W., Hermans B., Leus R. Scheduling a single parallel-batching machine with non-identical job sizes and incompatible job families. *European Journal of Operational Research*, 2022, vol. 303, no. 3–4, pp. 602–615. doi:10.1016/j.ejor.2022.03.027
- Ogun B., Alabas-Uslu Ç. Mathematical models for a batch scheduling problem to minimize earliness and tardiness. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 390–405. doi:10.3926/jiem.2541, EDN: YJFIVF
- Pei J., Cheng B., Liu X., Pardalos P. M., Kong M. Single-machine and parallel-machine serial-batching scheduling problems with position-based learning effect and linear setup time. *Annals of Operations Research*, 2019, vol. 272, no. 1–2, pp. 217–241. doi:10.1007/s10479-017-2481-8, EDN: VBVGZU
- Wu W., Tang L., Pizzuti A. Robust scheduling for minimizing maximum lateness on a serial-batch processing machine. *Information Processing Letters*, 2024, no. 186, Article 106473. doi:10.1016/j.ipl.2024.106473
- Li Sh., Li M., Khan M. I. Algorithms for two-agent unbounded serial-batch scheduling with makespan and maximum lateness objectives. *Networks and Heterogeneous Media*, 2023, vol. 18, iss. 4, pp. 1678–1691. doi:10.3934/nhm.2023073, EDN: LTKVGD
- Rostami M., Shad S. A hybrid bee algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 2020, vol. 5, iss. 1, pp. 137–164. doi:10.22070/jqepo.2020.5317.1143
- Matin H. N. Z., Salmasi N., Shahvari O. Makespan minimization in flowshop batch processing problem with different batch compositions on machines. *International Journal of Production Economics*, 2017, vol. 193, pp. 832–844. doi:10.1016/j.ijpe.2017.09.015, EDN: VPBMXR
- Hidayat N. P., Oktaviani T. D., Halim A. H. Multiple item batch scheduling model on a batch processor to minimize total actual flowtime parts through the shop. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, May 2020, vol. 830(4), Article 042007. doi:10.1088/1757-899x/830/4/042007
- Hertrich Ch., Weiß Ch., Ackermann H., Heydrich S., Krümke S. O. Scheduling a proportionate flow shop of batching machines. *Journal of Scheduling*, 2020, vol. 23, no. 5, pp. 575–593. doi:10.1007/s10951-020-00667-2, EDN: SHXFJR
- Halim A. H., Hidayat N. P., Aribowo W. Single item batch-scheduling model for a flow shop with m batch-processing machines to minimize total actual flow time. *International Journal of Technology*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 816–826. doi:10.14716/ijtech.v13i4.4869, EDN: YPLIBH
- Zhang Y., Zhou Z., Liu J. The production scheduling problem in a multi-page invoice printing system. *Computer & Operation Research*, 2010, vol. 37, no. 10, pp. 1814–1821. doi:10.1016/j.cor.2010.01.014, EDN: XXDRJD
- Mauluddin Y. Three-stage flow-shop scheduling model with batch processing machine and discrete processing machine. *3rd Annual Applied Sciences and Engineering Conference AASEC 2018. Series: MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 197, Article 14002. doi:10.1051/mateconf/201819714002
- Shahvari O., Logendran R. Hybrid flow shop batching and scheduling with a bi-criteria objective. *International Journal of Production Economics*, 2016, no. 179, pp. 239–258. doi:10.1016/j.ijpe.2016.06.005, EDN: XZDKUD
- Wang S., Kurz M., Mason S., Rashidi E. Two-stage hybrid flow shop batching and lot streaming with variable sublots and sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, no. 22, pp. 6893–6907. doi:10.1080/00207543.2019.1571251, EDN: DBEBPS
- Suryadhini P. P., Sukoyo S., Suprayogi S., Halim A. H. A batch scheduling model for a three-stage flow shop with job and batch processors considering a sampling inspection to minimize expected total actual flow time. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 520–537. doi:10.3926/jiem.3438, EDN: VFMZBT
- Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G., Shmoys D. B. Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. *Department of Operations Research, Statistics, and System Theory*, 1989, vol. R 8909, pp. 1–70.
- Kovalev M. M. *Modeli i metody kalendarnogo planirovaniya* [Models and methods of calendar planning]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet Publ., 2004. 63 p. (In Russian).
- Asghari M., Fathollahi-Fard A. M., Mirzapour Al-e-hashem S. M. J., Dulebenets M. A. Transformation and linearization techniques in optimization: A state-of-the-art survey. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 2, Article 283. doi:10.3390/math10020283, EDN: ABRVQM
- Mohammadi S., Mirzapour Al-e-hashem S. M. J., Rekić Y. An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: A case study from a furniture manufacturing company. *International Journal of Production Economics*, 2019, vol. 219, iss. 1, pp. 347–359. doi:10.1016/j.ijpe.2019.05.017



UDC 004.728.3.057.4

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65

EDN: FKCCQN

## The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback

A. A. Burkov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-0920-585X](https://orcid.org/0000-0002-0920-585X)

R. O. Rachugin<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [orcid.org/0000-0001-5813-3867](https://orcid.org/0000-0001-5813-3867)

A. M. Turlikov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0001-7132-094X](mailto:turlikov@guap.ru), [turlikov@guap.ru](mailto:turlikov@guap.ru)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** One of the possible ways to increase the throughput of the random multiple access channel in cellular networks is to use preambles with early feedback. On the one hand, an increase in the number of preambles leads to a decrease in the number of collisions, which can improve the throughput. On the other hand, this leads to an increase in the duration of their transmission, which in turn can decrease the throughput. **Purpose:** To study the dependence of the throughput of the random access algorithm of the ALOHA type with an exploration phase on the number of unique preambles. **Results:** We describe a model of a random multiple access system with an ALOHA algorithm using an exploration phase based on early feedback and a limited number of unique preamble. We present a method for calculating the maximum throughput for the system with exact knowledge of the number of active users. We also determine the conditions for maximizing the throughput with different restrictions on the number of unique preambles. Then we propose a procedure for estimating the number of active users for the case when the number of active users is unknown and carry out the analysis of the throughput for such a system. The analysis has shown that the use of the proposed estimation procedure makes it possible to achieve the same throughput with the absence of information on the exact number of active users as with this information provided. **Practical relevance:** The proposed procedure for estimating the number of active users can be used in real-world random multiple access systems with the ALOHA algorithm and the exploration phase. When developing random access systems, the obtained dependence of the throughput on the number of unique preambles allows one to estimate the required number of unique preambles. **Discussion:** Within the framework of the conducted analysis of the throughput, the influence of the number of unique preambles on the duration of their transmission and the influence of this duration on the throughput have not been taken into account, which can be a further research direction.

**Keywords** – ALOHA, grant-free random access, preamble-based exploration, estimation, throughput, ergodicity, Markov chain.

**For citation:** Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 58–65. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65, EDN: FKCCQN

### Introduction

Long-Term Evolution (LTE) networks use a 4-step random access (RA) scheme, and data transmission is carried out based on scheduling, by allocating resources in the channel based on the preambles received in the first step. The allocation of these resources is called grants, and the RA principle itself is called the grant-based principle [1]. The scenario of massive Machine-Type Communication (mMTC) is characterized by Small Data Transmission (SDT) and the overhead of control signaling becomes significant compared to data transmission [1]. Starting with 3GPP Release 16, it is possible to use a 2-step RA channel in 5G New Radio (NR) [2, 3]. The use of 2-step RA schemes is expected to reduce access latency and increase throughput to support a more number of mMTC devices [4, 5]. The 2-step RA scheme categorized as grant-free RA.

Regardless of the RA scheme used, the first step involves the selection and transmission of one of the

unique preambles by each user. If the preamble is selected by only one user, then this user will be able to transmit their data without collision. As a rule, preambles are generated based on the Zadoff – Chu sequence. The properties of these sequences are well studied and a detailed description of their properties is considered in [6, 7]. As the number of users increases with a limited number of unique preambles, the average transmission delay in RA mode increases. This is due to the increased probability of a collision occurring during data transmission, which is associated with an increased probability of selecting one preamble by several users. To solve this problem, there is a special mechanism called access class barring (ACB) [8–10]. The idea of this mechanism is that users make a decision to transmit a preamble at the first step of the RA procedure with a certain probability. Thus, not all users will transmit the preamble at step 1 in each iteration of the procedure, which allows reducing the number of collisions and the average transmission delay in RA

systems. To reduce the average delay, the transmission probability in ACB should generally depend on the number of users participating in the RA procedure [11]. Based on the exact knowledge of the number of users ready to transmit, it is possible to select the optimal transmission probability that minimizes the average transmission delay. This strategy uses knowledge of the exact number of users, which is not feasible in practice.

The works [5] and [12] describe and explore the improving of increasing the efficiency of the grant-free RA scheme through early feedback. Early feedback can be achieved by early detection of preamble collisions [13]. Thus, the paper [12] discusses an algorithm based on multi-channel ALOHA, which uses two phases: the Exploration Phase (EP), during which preambles are transmitted, and the Data Transmission Phase (DTP), during which user messages are transmitted. The analysis of this algorithm is given under the assumption that there are no retransmissions, the number of unique preambles is unlimited and the number of independent channels tends to infinity. In addition, it is shown that the maximum throughput per channel can reach  $e^{-1}(2 - e^{-1})$ .

The paper [14] provides an analysis for the same system and examines the dependence of the maximum throughput per channel on the number of channels. A system with retransmission is also considered and an approach to stabilizing this algorithm with an unlimited number of unique preambles is described. The proposed approach requires knowing exactly how many users have a message ready to be transmitted, which is difficult in real systems. Further, in the paper [15] provides a rule for estimating the number of active users and an analysis of the stability region of such a system. The paper [16] considers a system with one channel without retransmissions and shows the dependence of throughput on the number of unique preambles.

This paper addresses a similar problem, but for a system with retransmissions.

For modern cellular networks, there are various quality of service (QoS) criteria that are analyzed when studying such systems [17]. In this paper, the main QoS criterion when analyzing a 2-step RA scheme is the maximum throughput up to which the system remains stable. There are also various methods for increasing the efficiency of IoT systems, for example, those described in [18].

Since, 5G generation networks are considered as a possible environment for data transmission of computing networks. In this case, an important indicator is the maximum readiness to service emerging requests [19]. When transmitting data in RA mode, various scenarios or types of traffic can be considered. For example, video transmission is a subtype of heterogeneous traffic, for which it is

quite important to reduce the average delay in data delivery [20]. For these cases, it remains important to ensure maximum throughput, which can be achieved by the approaches in the work under consideration.

In this work presents a model of a system, assuming that the number of active user is known, and indicates the differences from the work of [12]. The operation of the system is described by a one-dimensional Markov chain, and it is shown that the problem of calculating throughput is reduced to determining the conditions of ergodicity (stability) of the Markov chain. Besides it, we consider the rejection of the assumption that the number of active users is known, propose a procedure for estimating this number, show that the operation of the system is described by a two-dimensional Markov chain, and propose a method for determining the ergodicity conditions. In addition, we describe the impact of the number of unique preambles and the active user estimation procedure parameter on throughput.

## System model

To describe the model, we introduce a number of assumptions.

*Assumption 1.* There are  $L$  unique preambles. A preamble is a sequence of bits of some length that is much shorter than the length of user messages. The duration of the preamble transmission is the same. The base station (BS) always reliably determines the number of unique preambles received from the channel. Information about the number of preambles received is communicated to all users without errors through the feedback channel.

*Remark 1:* Typically, in RA schemes that use BS preambles, one wants to find all the uniquely received preambles. In our case, as in [12], BS only needs to determine the number of unique preambles received.

*Assumption 2.* The total operating time of the system is divided into frames of equal length. The frames are numbered by the natural numbers  $t$ . Each frame is divided into two phases: the EP with a duration of  $T_p$  and the DTP with a duration of  $T_d$ . During the EP, each user can choose and transmit one of the unique preambles. During the DTP, users transmit messages. Each phase ends with a response from the BS. Users know the exact frame boundaries, as well as phases, and can participate in the RA procedure only at the beginning of each frame.

*Assumption 3.* At each of the phases, one of the following events may occur:

- success – preamble or data was transmitted by a single user;
- empty – no data or preamble transmitted;

– conflict – preambles or data were transmitted by two or more users simultaneously.

*Remark 2:* If there is a conflict arises at the EP, then in accordance with assumption 1, the BS will reliably determine the number of unique preambles received. If a conflict arises during the DTP, then user messages cannot be correctly received on the BS.

*Assumption 4.* The system has a potentially infinite number of users. In this case, the concepts of “user message” and “user” are equivalent. The number of messages entering into the system in a single frame is distributed according to the Poisson’s law with the parameter  $\lambda$ .

*Assumption 5.* The case is considered when  $T_p \ll T_d$ , so the following is assumed:  $T_p = 0$  time units, and  $T_d = 1$  time units.

*Assumption 6.* The number of active users in frame number  $t$  is known. Let’s denote it as  $M_t$ .

The operation of the system under consideration can be described using the following algorithm.

*Step 1.* Each user decides to transmit the preamble with the following probability:

$$P_{EP} = \min\left(1, \frac{G}{M_t}\right), \quad (1)$$

where  $G$  is a parameter that affects the probability of transmission to the EP.

*Step 2.* Users who decide to transmit during the EP randomly select one of the  $L$  unique preambles.

*Step 3.* The BS determines the number of unique preambles received. Transmits information about this number to all users through the feedback channel.

*Step 4.* If there is only one preamble in the channel, then the user who passed that preamble sends their data with one hundred percent probability during the DTP. If more than one preamble is detected, it is up to users to independently decide whether to transmit their data during the DTP with probability

$$P_{DTP} = \frac{1}{U},$$

where  $U$  is the number of unique preambles detected during the EP.

*Step 5.* The BS informs all users about event occurred in the frame through the feedback channel. If the user who transmitted receives information that his message has been successfully transmitted, then he leaves the system. Otherwise, the user repeats the previous steps of the algorithm until their message is successfully transmitted.

Steps 1–3 define the EP, while steps 4 and 5 define the DTP.

A similar system model was considered in [12]. Assumptions 2–5 of the presented system model are

fully consistent with the assumptions from [12]. The main differences between the system discussed in [12] and the one presented here are follows:

– the presence of an unlimited number of unique preambles (assumption 1 differs in that the number of unique preambles is finite and equal to  $L$ );

– the presence of a large number of independent channels (only one channel is considered in this work);

– at step 1 of the algorithm, all users transmit with probability 1 [in the algorithm under consideration, the probability is determined by equation (1)];

– there are no retransmissions and a user who made the transmission during DTP leaves the system regardless of the event in the channel (there are retransmissions in this work, see step 5 of the algorithm).

### Throughput with the knowledge of the exact number of active users

The number of active users in the system under consideration can be described by the following recurrent expression:

$$M_{t+1} = M_t - N_t + V_t,$$

where  $M_t$  and  $M_{t+1}$  are the number of active users in the system in frames  $t$  and  $t + 1$ ;  $N_t$  is the number of users leaving the system in the frame  $t$ ;  $V_t$  is the number of users entering the system during the frame  $t$ , distributed according to the Poisson’s law with the parameter  $\lambda$ .

Thus, the sequence of random variables  $M_t$  defines a homogeneous irreducible aperiodic Markov chain. Based on the results from [15], we will understand the throughput as the upper bound of the input arrival rate, up to which the Markov chain is ergodic:

$$T(G, L) = \sup_{\lambda} \{\lambda : \text{Markov chain ergodic}\}.$$

Using approaches from the works [21], it can be shown that the value of  $T(G, L)$  can be calculated using the following equation:

$$T(G, L) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{B_t | M_t = n\}. \quad (2)$$

Let us show how to calculate the probability  $\Pr\{B_t | M_t = n\}$ . Based on the definition given earlier, this probability can be calculated as follows:

$$\Pr\{B_t | M_t = n\} = n p_{EP} (1 - p_{EP})^{n-1} + \sum_{i=2}^n C_n^i p_{EP}^i (1 - p_{EP})^{n-1} \Pr\{B_t | i\},$$

where  $\Pr\{B_t|i\}$  is the probability of the event “Success” for  $i$  users and  $L$  preambles. This probability can be calculated using the formula

$$\Pr\{B_t|i\} = \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \Pr\{j|i\} \Pr\{B_t|j, i\}. \quad (3)$$

Formula (3) consists of the product of two probabilities:  $\Pr\{j|i\}$  is the probability that  $i$  users will independently select and transmit  $j$  unique preambles from a total of  $L$  unique preambles;  $\Pr\{B_t|j, i\}$  is the probability of the “Success” event with  $j$  preambles detected after the EP and  $i$  active users.

The probability  $\Pr\{j|i\}$  is reduced to the following combinatorial problem: there are  $L$  boxes, and  $i$  indistinguishable objects distributed randomly among these boxes. It is necessary to calculate the probability that  $j$  boxes will contain at least one object.

The book [22] describes a well-known combinatorial problem in which the probability of the distribution of empty boxes is found [p. 108, formula (2.4)]. A similar formula was re-derived in the work [8] [formula (19)]. Using the result from [22, 8] and modifying it for our problem, the desired probability can be calculated as follows:

$$\Pr\{j|i\} = C_L^{L-j} \sum_{v=0}^j (-1)^v C_j^v \left(1 - \frac{L-j+v}{L}\right)^i. \quad (4)$$

The probability  $\Pr\{B_t|j, i\}$  can be calculated as

$$\Pr\{B_t|j, i\} = i \frac{1}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1}. \quad (5)$$

Generalizing formulas (3)–(5) and substituting the value  $p_{EP} = \frac{G}{M_t}$ , formula (2) will have the following form:

$$\begin{aligned} T(G, L) = & \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\{B_t | M_t = n\} = Ge^{-G} + \\ & + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{G^i}{i!} e^{-G} \sum_{j=2}^{\min(i,L)} C_L^{L-j} \sum_{v=0}^j (-1)^v \times \\ & \times C_j^v \left(1 - \frac{L-j+v}{L}\right)^i i \frac{1}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1}. \end{aligned}$$

Based on equation (2), it is clear that for a fixed number of unique preambles, the value of  $G$  affects the value of throughput. The function is monotone and unimodal for all positive values of  $G$  on the interval from 0 to infinity. Consequently, the throughput value for a given number of preambles can be maximized by the parameter  $G$ . We will denote the maximum throughput value for a given number of preambles  $L$  as  $T_{\max}(L) = \max_G T(G, L)$ , and

■ Maximum throughput and the corresponding parameter values  $G$  and  $Q$

$L$	$T_{\max}(L)$	$G_{\text{opt}}(L)$	$Q_{\text{opt}}(L)$
1	0.367	1.00	0.0000
2	0.448	1.31	0.1360
4	0.498	1.54	0.2150
8	0.523	1.67	0.3315
16	0.536	1.72	0.4100
32	0.542	1.74	0.4470
64	0.545	1.75	0.4683
$\infty$	0.548	1.77	0.4917

the value of the parameter at which it is achieved as  $G_{\text{opt}}(L) = \arg \max_G T(G, L)$ . The results of the calculation of these values for different numbers of preambles are shown in Table (see columns 2 and 3).

*Remark 3:* If we consider the presence of an unlimited number of unique preambles, then the calculation of the throughput will be performed according to the following formula [14]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T(G, L) = Ge^{-G} + \sum_{i=2}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1} \frac{G^i}{i!} e^{-G}.$$

The calculation result for this case is given in the last row of the Table.

It should be noted that at  $L = 1$  the algorithm in question corresponds to the regular ALOHA algorithm, and the maximum throughput is reached at  $G = 1$ . With an increase in the number of preambles, the optimal value of  $G$  increases, which means an increase in the probability of transmission during the EP.

### Throughput when using the procedure for estimating the number of active users

In real-world systems, there is no way to reliably know the number of active users at the beginning of each frame to determine the probability of transmission during the EP. To approximate real conditions, one can use some procedure for estimating the number of active users in a frame based on the approach proposed in [21]. In this case, assumption 6 is excluded from the system of assumptions. Step 1 of the system operation algorithm is modified as follows.

1. First, the procedure for estimating the number of active users is performed according to the following recurrent rule (where  $S_1 = 1$ ):

$$S_{t+1} = \max[1, S_t + aI\{A_t\} + bI\{B_t\} + cI\{C_t\}],$$

where  $I\{\cdot\}$  is the indicator function. The coefficients  $a$ ,  $b$  and  $c$  are defined as follows:

$$a = Q - 1; b = Q - 1; c = \frac{2}{(e - 2)} + Q,$$

where  $Q$  is an estimation parameter that depends on the number of unique preambles.

2. Then the probability of transmission during the EP in frame  $t$  is calculated using the equation:

$$P_{EP} = \min\left(1, \frac{G}{S_t}\right). \quad (6)$$

In this case, the operation of this system will be described by a two-dimensional Markov chain  $(M_t, S_t)$ .

To determine the ergodicity conditions of a given Markov chain, we calculate the average drift for each component of the given Markov chain:

$$\begin{aligned} E[M_{t+1} - M_t | S_t = s, M_t = n] &= \\ &= \lambda - \Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}; \\ E[S_{t+1} - S_t | S_t = s, M_t = n] &= \\ = c + (a - c)\Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\} + \\ &+ (b - c)\Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}, \end{aligned}$$

where  $\Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}$  is the probability of the event "Success" on the DTP and  $\Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\}$  is the probability of the event "Empty" on the DTP.

In further derivation we will take into account the fact that the number of users who decided to transmit to the EP is distributed according to the binomial law with parameters  $p_{EP}$  and  $n$ .

Note that "Success" on the DTP can occur in two situations:

- 1) the "Success" event on the EP;
- 2) the "Conflict" event on the EP and the "Success" event on the DTP.

Taking into account the above, the probability  $\Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}$  can be calculated using the following formula:

$$\begin{aligned} \Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\} &= np_{EP}(1 - p_{EP})^{n-1} + \\ &+ \sum_{i=2}^n C_n^i p_{EP}^i (1 - p_{EP})^{n-i} \Pr\{B_t | i\} = \\ &= \frac{nG}{s} \left(1 - \frac{G}{s}\right)^{n-1} + \sum_{i=2}^n C_n^i \left(\frac{G}{s}\right)^i \left(1 - \frac{G}{s}\right)^{n-i} \times \\ &\times \sum_{j=2}^{\min(i,L)} C_L^{L-j} \sum_{v=0}^j (-1)^v C_j^v \left(1 - \frac{L-j+v}{L}\right)^i \frac{1}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1}. \end{aligned}$$

Similarly, the event "Empty" on the DTP can occur in two situations:

1) the event "Conflict" on the EP and the event "Empty" on the DTP;

2) the event "Empty" on the EP.

Therefore, the probability  $\Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\}$  is determined as follows:

$$\begin{aligned} \Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\} &= (1 - p_{EP})^n + \\ &+ \sum_{i=2}^n C_n^i p_{EP}^i (1 - p_{EP})^{n-i} \Pr\{A_t | i\} = \\ &= \left(1 - \frac{G}{s}\right)^{n-1} + \sum_{i=2}^n C_n^i \left(\frac{G}{s}\right)^i \left(1 - \frac{G}{s}\right)^{n-i} \times \\ &\times \sum_{j=2}^{\min(i,L)} C_L^{L-j} \sum_{v=0}^j (-1)^v C_j^v \left(1 - \frac{L-j+v}{L}\right)^i \left(1 - \frac{1}{j}\right)^i. \end{aligned}$$

As was done in paper [21] on determining the conditions of ergodicity, we will introduce the functions  $\mu_n(\lambda, k)$  and  $\mu_s(k)$ :

$$\begin{aligned} \mu_n(\lambda, k) &= \lambda - \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s \rightarrow \infty \\ k = n/s}} \Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}; \\ \mu_s(k) &= c + (a - c) \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s \rightarrow \infty \\ k = n/s}} \Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\} + \\ &+ (b - c) \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s \rightarrow \infty \\ k = n/s}} \Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\}. \end{aligned}$$

Taking into account that when  $n \rightarrow \infty$  and  $s \rightarrow \infty$  the binomial distribution turns into a Poisson distribution with the parameter  $k = n/s$ , therefore the limits indicated above can be calculated as follows:

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s \rightarrow \infty \\ k = n/s}} \Pr\{B_t | S_t = s, M_t = n\} &= \\ &= Gke^{-Gk} + \sum_{i=2}^{\infty} e^{-Gk} \frac{(Gk)^i}{i!} \Pr\{B_t | i\} = \\ &= e^{-Gk} \left( Gk + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(Gk)^i}{i!} \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \frac{i}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1} \Pr\{j | i\} \right); \\ \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s \rightarrow \infty \\ k = n/s}} \Pr\{A_t | S_t = s, M_t = n\} &= \\ &= e^{-Gk} + \sum_{i=2}^{\infty} e^{-Gk} \frac{(Gk)^i}{i!} \Pr\{A_t | i\} = \\ &= e^{-Gk} \left( 1 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(Gk)^i}{i!} \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^i \Pr\{j | i\} \right). \end{aligned}$$



Therefore:

$$\begin{aligned} \mu_n(\lambda, k) &= \lambda - e^{-Gk} \left( Gk + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(Gk)^i}{i!} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \frac{i}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1} \Pr\{j|i\} \right); \\ \mu_s(k) &= c + (a-c)e^{-Gk} \left( 1 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(Gk)^i}{i!} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^i \Pr\{j|i\} \right) + \\ &+ (b-c)e^{-Gk} \left( Gk + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{(Gk)^i}{i!} \sum_{j=2}^{\min(i,L)} \frac{i}{j} \left(1 - \frac{1}{j}\right)^{i-1} \Pr\{j|i\} \right). \end{aligned}$$

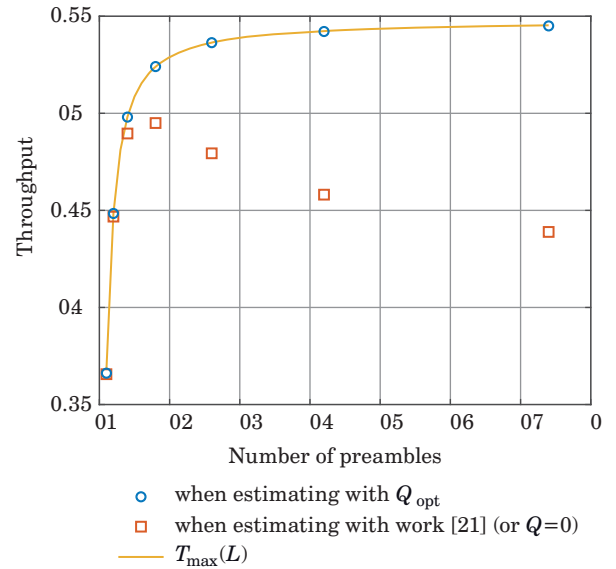
It follows from the work [21] that in order to determine whether the Markov chain  $(M_t, S_t)$  is ergodic for some value of  $\lambda$ , the following steps must be taken:

- 1) for a fixed value of  $\lambda$ , solve the equation  $\mu_n(\lambda, k) = k\mu_s(k)$  for the variable  $k$ ;
- 2) check that the following condition is met for all roots of the equation:  $\mu_n(\lambda, k_i) < 0$ ;  $\mu_s(k_i) < 0$ ;
- 3) if the condition is satisfied, then the Markov chain is ergodic.

For a fixed a given number of unique preambles  $L$  and throughput with exact knowledge of the number of active users  $T(G, L)$ , we can numerically find the estimation parameter  $Q$  for which, according to the estimation procedure, the Markov chain is ergodic. For a throughput equal to  $T_{\max}(L)$ , the value of the parameter  $Q$ , at which the Markov chain is ergodic, will be called optimal and denoted as  $Q_{\text{opt}}(L)$ . The values of  $Q_{\text{opt}}(L)$  for a different numbers of unique preambles are also presented in Table (see column 4).

### Impact of the estimation procedure parameter on throughput

The work [21] describes a similar procedure for estimating the average number of active users for a typical ALOHA algorithm with a single channel. The difference between the estimation procedure proposed in this work and [21] is the introduction of the parameter  $Q$ . It can be noted that the Markov chain which describes the operation of our system for  $L = 1$  and  $G = 1$  completely coincides with the Markov chain from the paper [21]. In this case, for the system in question  $Q_{\text{opt}} = 0$ , so the estimation procedure will be exactly the same as described in [21]. If we use the estimation procedure for our system with  $Q = 0$  (the estima-



■ Throughput versus number of unique preambles

tion procedure is similar to [21]), then for a given number of unique preambles, the throughput value will not reach the possible maximum. To maximize throughput, one must use the values of  $Q_{\text{opt}}(L)$ . Based on these results, we can conclude that using  $Q_{\text{opt}}(L)$  one can achieve a throughput value of  $T_{\max}(L)$  when knowing the exact number of active users. These results are shown in Figure. The values of  $T_{\max}(L)$  were calculated according to with the definition given earlier. The throughput values based on our estimation were obtained for some values of  $L$  taking into account the ergodicity of the Markov chain.

### Conclusion

This paper discusses a system with retransmissions, a single channel, and an ALOHA algorithm with an exploration phase with a limited number of unique preambles. The calculation of throughput and its maximization for a different number of unique preambles with a known number of active users is given. A modification of the algorithm considered in the work is described, which includes a procedure for estimating the number of active users. It has been shown that by estimating with this procedure the number of active users, it is possible to achieve the same throughput as if the number of these users were known exactly.

If the number of unique preambles is 32 or more, the throughput values become close to the value in the case of throughput, when the number of preambles is infinite (see Table). In addition, it can be assumed that by increasing the num-

ber of channels used in the system with a limited number of preambles, it is possible to achieve a throughput per channel equal to  $e^{-1}(2 - e^{-1})$  as shown in paper [12] for a system without retransmissions and an unlimited number of unique preambles.

## References

- Zhou H., Deng Y., Feltrin L., Höglund A., & Dohler M. Novel random access schemes for small data transmission. *IEEE Intern. Conf. on Communications (ICC)*, IEEE, 2022, pp. 1992–1997. doi:10.1109/ICC45855.2022.9839227
- Kim J., Lee G., Kim S., Taleb T., Choi S., Bahk S. Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges. *IEEE Network*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 273–279. doi:10.1109/MNET.011.2000317
- Peralta E., Levanen T., Frederiksen F., Valkama M. Two-step random access in 5G new radio: Channel structure design and performance. *IEEE 93rd Vehicular Technology Conf. (VTC2021-Spring)*, IEEE, 2021, pp. 1–7. doi:10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9449057
- Seo J.-B., Toor W. T., Jin H. Analysis of two-step random access procedure for cellular ultra-reliable low latency communications. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 5972–5985. doi:10.1109/ACCESS.2020.3048824
- Choi J. *Random Access Techniques for Machine-Type Communication*. In: *Next Generation Multiple Access*. Wiley-IEEE Press, 2024, pp. 259–285. https://doi.org/10.1002/9781394180523.ch11
- Gregoratti D., Arteaga X., Broquetas J. *Mathematical Properties of the Zadoff-Chu Sequences*. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.01035
- Andrews J. G. *A Primer on Zadoff Chu Sequences*. 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05702
- Song S., Seo J. B., Jin H. Online control of two-step random access: A step towards umtc. *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, IEEE, 2023, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNC55385.2023.10118949
- Piao Y., Kim Y., Lee T. J. Random power back-off for random access in 5G networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 121561–121569. doi:10.1109/ACCESS.2021.3109242
- Alvi M., Toor W. T., Rehman Y., Javed I., Idrees M., Imtiaz J., Assam M., Aziz A. S. A., Attia E. A. Mini-slot based access barring scheme for IoT networks. *Human-centric Computing and Information Sciences Journal*, 2023, vol. 13, pp. 13–32. https://doi.org/10.22967/HGIS.2023.13.032
- Jin H., Toor W. T., Jung B. C., Seo J. B. Recursive pseudo-Bayesian access class barring for M2M communications in LTE systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no. 9, pp. 8595–8599. doi:10.1109/TVT.2017.2681206
- Choi J. On improving throughput of multichannel ALOHA using preamble-based exploration. *Journal of Communications and Networks*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 380–389. doi:10.1109/JCN.2020.000024
- Zhen L., Zhang Y., Yu K., Kumar N., Barnawi A., Xie Y. Early collision detection for massive random access in satellite-based Internet of Things. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 5, pp. 5184–5189. doi:10.1109/TVT.2021.3076015
- Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2022, no. 5, pp. 49–59. doi:10.31799/1684-8853-2022-5-49-59, EDN: KG-VYDI
- Burkov A., Rachugin R., Turlikov A. Stabilizing ALOHA using Preamble-based exploration by estimation of the number of active users. *2023 XVIII Intern. Symp. Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*, IEEE, 2023, pp. 106–109. doi:10.1109/Redundancy59964.2023.10330186
- Burkov A., Rachugin R., Turlikov A. Maximum output rate of ALOHA with exploration phase and limited number of preambles. *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2024, no. 2, pp. 38–43.
- Alzagir A. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Study of quality of service in 5G and next-generation networks. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2022, no. 6, pp. 2–7 (In Russian). doi:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- Paramonov A. I., Bushelenkov S. N. Analysis of methods to increase the efficiency of IoT networks. *TELECOM IT*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 36–52 (In Russian). doi:10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52
- Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3(145), pp. 608–617 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617
- Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information*

## Financial support

The paper was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305 “Spatial-temporal stochastic models of wireless networks with a large number of users”.

*Science Intern. Conf. on Distributed Computer and Communication Networks*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9)

21. Mikhailov V. A. Geometrical analysis of the stability of Markov chains in  $R^n$  and its application to throughput evaluation of the adaptive random multiple access

algorithm. *Problems of Information Transmission*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 61–73 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-79-85

22. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and its Applications*. 3rd Ed. John Wiley & Sons, 1968. 509 p.

УДК 004.728.3.057.4

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65

EDN: FKCCQN

### Влияние числа уникальных преамбул на область стабильной работы алгоритма АЛОХА с ранней обратной связью

А. А. Бурков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-0920-585X](https://orcid.org/0000-0002-0920-585X)

Р. О. Рачугин<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0001-5813-3867](https://orcid.org/0000-0001-5813-3867)

А. М. Турликов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7132-094X](https://orcid.org/0000-0001-7132-094X), [turlikov@guap.ru](mailto:turlikov@guap.ru)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** одним из возможных путей повышения пропускной способности канала случайного множественного доступа в со-товых сетях является использование преамбул с ранней обратной связью. Увеличение числа преамбул приводит, с одной стороны, к уменьшению числа коллизий, что может повысить пропускную способность, с другой стороны — к увеличению длительности их передачи, что, в свою очередь, может понизить пропускную способность. **Цель:** исследовать зависимость пропускной способности алгоритма случайного доступа типа АЛОХА с фазой исследования от числа уникальных преамбул. **Результаты:** описана модель системы случайного множественного доступа с алгоритмом типа АЛОХА при использовании фазы исследования на основе ранней обратной связи и ограниченным числом уникальных преамбул. Представлен способ вычисления максимальной пропускной способности для системы при точном знании числа активных абонентов. Определены условия для максимизации пропускной способности при различном ограничении на число уникальных преамбул. Предложена процедура оценки числа активных абонентов для случая, когда число активных абонентов неизвестно. Для системы с неизвестным числом активных абонентов проведен анализ пропускной способности. В результате анализа показано, что при отсутствии информации о точном количестве активных абонентов использование предложенной процедуры оценки позволяет добиться такой же пропускной способности, как и при наличии этой информации. **Практическая значимость:** предложенная процедура оценки числа активных абонентов может быть использована в реальных системах случайного множественного доступа с алгоритмом АЛОХА и фазой исследования. При разработке систем случайного доступа полученная зависимость пропускной способности от числа уникальных преамбул позволяет оценить необходимое количество уникальных преамбул. **Обсуждение:** в рамках проведенного анализа пропускной способности не учитывалось влияние числа уникальных преамбул на длительность их передачи и влияние этой длительности на пропускную способность, что может быть дальнейшим направлением исследования.

**Ключевые слова** — АЛОХА, случайный доступ без выделения грантов, фаза исследования на основе преамбул, оценка, пропускная способность, эргодичность, марковская цепь.

**Для цитирования:** Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 58–65. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65, EDN: FKCCQN

**For citation:** Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 58–65. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65, EDN: FKCCQN



## Итоги Международной конференции MoNeTec-2024 по сетевым технологиям и искусственному интеллекту

<https://cs.msu.ru/news/4175>

С 29 по 31 октября в МГУ имени М. В. Ломоносова состоялась 5-я Международная конференция «Современные сетевые технологии» (MoNeTec-2024), объединившая более 300 экспертов из науки, бизнеса и академического сообщества. В гибридном формате участники конференции обсудили перспективы и вызовы в области сетевых технологий, искусственного интеллекта и облачных вычислений.



Программа MoNeTec-2024 включала более 50 докладов по таким темам, как 5G/6G, интернет вещей и вопросы безопасности искусственного интеллекта. Сильный интерес вызвали выступления ведущих экспертов, которые представили инновационные разработки и прогнозы по развитию цифровой инфраструктуры. Конференция стала не только площадкой для научного обмена, но и инициировала новые партнерства и совместные проекты.



Также в рамках конференции состоялась встреча ректора МГУ В. А. Садовниченко с профессорами Хай Дзинем и Дзяньян Ху, представляющими Пекинский университет и Университет науки и технологий провинции Ухань. 30 октября В. А. Садовниченко рассказал о традициях и достижениях МГУ, подчеркнув значимость развития научных связей с крупнейшими китайскими университетами. Ректор отметил важность совместных исследований и обмена опытом в области сетевых технологий и искусственного интеллекта, что открывает



новые перспективы для академического сотрудничества между университетами России и Китая.

Организаторы благодарят основного спонсора конференции, Научно-исследовательский центр ELVEES, а также других партнеров: Объединенный институт ядерных исследований, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, «Криптонит», BaseALT и МГУ. Поддержка спонсоров позволила создать условия для успешного проведения MoNeТес-2024 и укрепить связи между академическим и деловым сообществами в области цифровых технологий.



---

### **УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!**

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой – различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

**БУРКОВ**  
Артем  
Андреевич



Доцент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2017 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

В 2023 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций.

Область научных интересов – беспроводные системы передачи данных, алгоритмы случайного множественного доступа, системы с гибридной решаемой обратной связью и др.

Эл. адрес: a.burkov@k36.org

**ЖУКОВА**  
Наталья  
Александровна



Доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социоконвергентных систем Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2005 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2019 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «Теория систем и системный анализ».

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов – интеллектуальные системы, анализ данных.

Эл. адрес: nazhukova@mail.ru

**КРОТОВ**  
Кирилл  
Викторович



Доцент кафедры информационных систем Севастопольского государственного университета. В 1993 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Автоматизированные системы управления и обработки информации».

В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов – теория расписаний, многоуровневая и дискретная оптимизация.

Эл. адрес: krotov\_k1@mail.ru

**ЗАЙЦЕВА**  
Александра  
Алексеевна



Старший научный сотрудник лаборатории автоматизации научных исследований Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2001 году с отличием окончила магистратуру Санкт-Петербургского государственного технического университета по специальности «Системный анализ и управление».

В 2009 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций и восьми авторских свидетельств на РИД.

Область научных интересов – инфокоммуникационные системы, методы и технологии обработки больших данных, обработка естественно-языковых текстов.

Эл. адрес: cher@iias.spb.su

**ИВАНОВ**  
Михаил  
Евгеньевич



Аспирант кафедры эксплуатации и управления в аэрокосмических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2020 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение».

Является автором пяти научных публикаций и одного свидетельства о регистрации ЭВМ.

Область научных интересов – космонавтика, моделирование аэрокосмических систем управления, методы искусственного интеллекта.

Эл. адрес: sindbad1995@list.ru

**КУЛЕШОВ**  
Сергей  
Викторович



Главный научный сотрудник, руководитель лаборатории автоматизации научных исследований Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

В 2003 году с отличием окончил Курганский государственный университет по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 90 научных публикаций и десяти авторских свидетельств на РИД.

Область научных интересов – инфокоммуникационные системы и компьютерная лингвистика, ассоциативно-онтологическая обработка естественно-языковых текстов.

Эл. адрес: kuleshov@iias.spb.su

**МАТАСОВ  
Юрий  
Федорович**



Доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2000 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Инженер радиоэлектронной техники».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций и шести патентов на программное обеспечение.

Область научных интересов – эксплуатация и управление аэрокосмическими системами.

Эл. адрес: yfmatasov@yandex.ru

**МИЛОСЕРДОВ  
Дмитрий  
Игоревич**



Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

В 2018 году окончил Университет ИТМО по специальности «Информационная безопасность».

В 2022 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 13 научных публикаций.

Область научных интересов – нейронные сети, прогнозирование временных рядов.

Эл. адрес: dmmil94@yandex.ru

**ОСИПОВ  
Василий  
Юрьевич**



Профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

В 1981 году окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. А. С. Попова по специальности «Радиотехнические средства».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и семи патентов на изобретения.

Область научных интересов – интеллектуальные системы, нейронные сети, моделирование, информационная безопасность.

Эл. адрес: osipov\_vasily@mail.ru

**РАЧУТИН  
Роман  
Олегович**



Аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2023 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Область научных интересов – теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, опто-информационные системы.

Эл. адрес: rro1699@gmail.com

**САВЕЛЬЕВА  
Маргарита  
Геннадьевна**



Аспирант кафедры информационных систем и технологий Белорусского государственного технологического университета, Минск.

В 2021 году окончила Белорусский государственный технологический университет по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации».

Является автором 33 научных публикаций.

Область научных интересов – защита информации, стеганография.

Эл. адрес: margarita.saveleva.98@mail.ru

**СУББОТИН  
Алексей  
Николаевич**



Аспирант кафедры математического обеспечения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», ведущий инженер-программист «Ленполиграфмаша», ГУП «Петербургский метрополитен», ведущий специалист «М-Стандарт Холдинг».

В 2008 году окончил Санкт-Петербургский инженерно-экономический университет по специальности «Прикладная информатика (в экономике)».

Является автором 27 научных публикаций и двух регистраций программ.

Область научных интересов – туманные вычисления, облачные среды, распределенные вычисления, обработка изображений, машинное обучение, нейронные сети.

Эл. адрес: alesu1543@gmail.com

**ТЮРЛИКОВ  
Андрей  
Михайлович**

Профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Информационные системы управления».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов – многоабонентные системы связи, системы дистанционного обучения, протоколы передачи данных в реальном масштабе времени, алгоритмы сжатия видеоинформации.

Эл. адрес: turlikov@guar.ru

**УРБАНОВИЧ  
Павел  
Павлович**

Профессор кафедры информационных систем и технологий Белорусского государственного технологического университета, приглашенный профессор Люблинского Католического университета, Польша. Заслуженный работник образования Республики Беларусь.

В 1977 году окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по специальности «Радиотехника».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 500 научных публикаций.

Область научных интересов – надежность и информационная безопасность радиоэлектронных средств, компьютерных систем и сетей и др.

Эл. адрес: p.urbanovich@belstu.by

---

---

**ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ**

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью – рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

---

---



# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2024 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
<b>Belyaev A. S., Kushnarev O. Yu., Brylev O. A.</b> Synthesis of a hybrid underlying surface classifier based on fuzzy logic using current consumption of mobile robot motion	1	31
<b>Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M.</b> The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback	6	58
<b>Kryukov R. O., Fedorchenko E. V., Kotenko I. V., Novikova E. S., Zima V. M.</b> Security assessment based on attack graphs using NVD and MITRE ATT & CK database for heterogeneous infrastructures	2	39
<b>Pham Cong Thang, Nguyen Van Dung, Le Tuan Nguyen Khoi, Pham Duy Tin, Tran Thi Thu Thao.</b> Deep learning-based IoT system for fruit and vegetable recognition	2	9
<b>Акименко Т. А., Ларкин Е. В., Богомолов А. В., Привалов А. Н.</b> Модель формирования образа сцены в телевизионном модуле мобильного робота, движущегося по пересеченной местности	5	16
<b>Балонин Н. А., Сергеев А. М., Сергеев М. Б.</b> Матрицы семейства Адамара как срезы ортогонального гиперобъекта на смежных порядках	1	2
<b>Башмаков Н. М., Васильев В. И., Вульфин А. М., Картак В. М., Кириллова А. Д.</b> Обнаружение сетевых атак ботнетов на основе технологий машинного обучения и переноса знаний	5	41
<b>Величко А. Н., Карпов А. А.</b> Подход к распознаванию депрессии по речи человека с использованием полуавтоматической разметки данных	4	2
<b>Величко И. С., Афанасьева А. В., Беззатеев С. В.</b> Распределенный протокол генерации псевдослучайных чисел на основе алгоритма проверяемой случайной функции	3	32
<b>Востриков А. А., Сергеев А. М., Балонин Ю. Н., Куртяник Д. В., Рыжов К. Ю.</b> Опыт получения матриц максимума детерминанта бициклических структур на основе случайных последовательностей квантовой генерации	2	2
<b>Груздев Н. В., Шуваев Ф. Л.</b> Определение оптимального набора метрик подобию графов в задачах распознавания топологий техногенных космических объектов	1	9
<b>Жукова Н. А., Субботин А. Н.</b> Алгоритм динамического распределения обработки изображений в облачных системах интеллектуального видеонаблюдения	6	15
<b>Иванов М. Е., Матасов Ю. Ф.</b> Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана	6	27
Итоги Международной конференции MoNeTec-2024 по сетевым технологиям и искусственному интеллекту	6	66
<b>Ицыксон В. М., Онищук М. П., Кечин В. В., Алексеев Я. А.</b> Моделирование поведения функций стандартной библиотеки в задачах анализа программ	4	24
<b>Капуста К. Л., Кипяткова И. С., Кагиров И. А.</b> Аналитический обзор интегральных моделей и стратегий распознавания речи на основе архитектуры трансформер	5	2
<b>Колесникова С. И., Фоменкова А. А.</b> Модель системы стабилизации стохастического биоинженерного объекта на множестве целевых состояний и синергетической теории управления	5	25
<b>Костоготов А. А., Зехцер В. О.</b> Метод синтеза квазиоптимальных систем с дефицитом управления на базе редукции задачи Лагранжа	4	40
<b>Кротов К. В.</b> Модели смешанного целочисленного линейного программирования оптимизации включения заданий в пакеты и порядков проведения операций с ними в конвейерных системах	6	46

	№	Стр.
<b>Крылов Д. Р., Пойманова Е. Д., Тюрликов А. М.</b> Модель реплицируемой системы хранения данных с использованием среднего возраста информации в качестве показателя актуальности данных	3	11
<b>Липатников В. А., Шевченко А. А., Мелехов К. В., Ткачев Д. Ф.</b> Методика повышения защищенности сети передачи данных объектов критической информационной инфраструктуры при многоэтапных атаках	1	44
<b>Милосердов Д. И.</b> Усовершенствованная система нейросетевого прогнозирования групп временных рядов с непрерывным обучением	1	20
<b>Новикова Е. С., Кузнецова Е. О., Голубев С. А.</b> Выявление сетевых вторжений в промышленных киберфизических системах на основе сверточных нейронных сетей	5	57
<b>Осипов В. Ю., Кулешов С. В., Зайцева А. А., Милосердов Д. И.</b> Интеллектуальное нейрорегулирование новостными потоками с непрерывным обучением	6	35
<b>Рудаков Р. В., Сержантова М. В., Бойков В. И., Бушуев А. Б., Нуйя О. С., Литвинов Ю. В., Быстров С. В.</b> Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур	4	12
<b>Савельева М. Г., Урбанович П. П.</b> Стеганографическое преобразование на основе модификации полутоновых оттенков растрованных документов	6	2
<b>Солодуха Р. А.</b> Повышение точности стеганоанализа пространственной области изображений за счет дополнительных стегановложений	3	2
<b>Степанов М. А., Соколов В. С.</b> Соотношения для расчета диаграммы направленности ММО РЛС при различающихся антеннах приемных и передающих элементов, формирующих ее	1	56
<b>Сулавко А. Е., Иниватов Д. П., Васильев В. И., Ложников П. С.</b> Аутентификация по голосовым паролям с обеспечением конфиденциальности биометрических данных на основе корреляционных нейронов	2	21
<b>Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф.</b> Управление характеристиками систем массового обслуживания через сдвиг законов распределений в виде вероятностных смесей	3	24
<b>Таубин Ф. А., Трофимов А. Н.</b> Коды-произведения с полуслепым декодированием для одночастотной передачи в многолучевом канале с замираниями	5	68
Сведения об авторах	1	64
Сведения об авторах	2	54
Сведения об авторах	3	44
Сведения об авторах	4	50
Сведения об авторах	5	81
Сведения об авторах	6	68

## Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые формулы набирайте в Word, сложные с помощью редактора Mathtype или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в Mathtype никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, 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 символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>

### Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, подающихся редактированию, используя векторные программы: 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);

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

### В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png, \*.jpg с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение;

— экспортное заключение.

### Список литературы

составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указываете адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала

(<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов» — <http://i-us.ru/index.php/ius/author-guide>.

## Контакты

Куда: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)