

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2(141)/2026

2(141)/2026

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**

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, Kaliningrad, 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****Menisov A. B., Nagorny D. S., Shelest A. B.***A graph-based method for extended knowledge retrieval from specialized texts containing coordinates, geographical names, and abbreviations*

2

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Kuchmin A. Yu., Rasova S. S., Tarasova I. L.***Interval ART neural network for clustering images with interval attributes*

16

**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Gusakov V. M., Matasov Yu. F., Ivanov M. E.***Synthesis of a radar range portrait of an object based on modeling the reflective characteristics of its individual parts*

27

**Iakimenko S. I.***Development of models for calculating content access delays with account taken of caching in NDN networks*

36

**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Polesskiy S. N., Tumkovskiy S. N., Tsvetkov V. E., Korolev P. S.***Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model*

49

**Paul S. V., Fedorova E. A.***Asymptotic analysis of a queueing system with repeated calls and dynamic service rate*

61

**SYSTEM ANALYSIS****Volodarets N. V., Satsiuk A. V.***Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control*

72

**CHRONICLES AND INFORMATION***6th International Science and Technology Conference  
Modern Network Technologies – MoNeTec-2026*

80

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

82

2(141)/2026

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

## 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:

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. Мюльери,

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. Суткиноу,

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, Калининград, РФ

А. А. Шальто,

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

Менисов А. Б., Нагорный Д. С., Шелест А. Б.

Графовый метод расширенного поиска знаний в специализированных текстах, содержащих координаты, географические названия и аббревиатуры 2

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Кучмин А. Ю., Расова С. С., Тарасова И. Л.

Интервальная ART-нейронная сеть для решения задач кластеризации при анализе образов с интервальными атрибутами 16

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Гусаков В. М., Матасов Ю. Ф., Иванов М. Е.

Синтез дальностного портрета объекта на основе моделирования отражательных характеристик его отдельных частей 27

Якименко С. И.

Разработка моделей для расчета задержек доступа к контенту с учетом кеширования в сетях NDN 36

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Полесский С. Н., Тумковский С. Р., Цветков В. Э., Королев П. С.

Методика оценки функциональной безопасности маршрутизаторов на основе вероятностно-физической модели 49

Пауль С. В., Фёдоров Е. А.

Асимптотический анализ системы массового обслуживания с повторными вызовами и динамической интенсивностью обслуживания 67

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Володарец Н. В., Сацюк А. В.

Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления 72

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

6-я Международная научно-техническая конференция

«Современные сетевые технологии»

(Modern Network Technologies – MoNeTec-2026) 80

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 82

Журнал входит в БД Scopus и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 05.03.26. Подписано в печать 30.04.26. Дата выхода в свет: 04.05.26.

Формат 60×84/8. Гарнитура CentSchbkCyrill BT. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 13,6. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 151.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Распространяется бесплатно.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Перерегистрирован в Роскомнадзоре.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82226 от 23 ноября 2021 г.

© А. А. Востриков, 2026



## Графовый метод расширенного поиска знаний в специализированных текстах, содержащих координаты, географические названия и аббревиатуры

А. Б. Менисов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-9955-2694](https://orcid.org/0000-0002-9955-2694), [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

Д. С. Нагорный<sup>а</sup>, преподаватель, [orcid.org/0009-0008-5867-0011](https://orcid.org/0009-0008-5867-0011)

А. Б. Шелест<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0009-1944-0229](https://orcid.org/0009-0009-1944-0229)

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

**Введение:** современные методы расширенного поиска знаний демонстрируют ограниченную эффективность при обработке специализированных текстов, содержащих координаты, топонимы и аббревиатуры, поскольку такие данные требуют одновременного учета семантических и пространственно-структурных зависимостей. Традиционные векторные подходы ориентированы преимущественно на обобщенную семантическую близость и слабо отражают явные пространственные связи между сущностями, что снижает точность поиска в специализированных корпусах. **Цель:** разработать метод семантического поиска в специализированных текстах, содержащих координаты, топонимы и аббревиатуры, за счет интеграции пространственно-структурной информации в процесс расширенного поиска знаний. **Результаты:** предложена гибридная архитектура, объединяющая извлечение и нормализацию сущностей, построение графа знаний на основе пространственной и семантической близости, а также гибридный алгоритм поиска, сочетающий графовый и векторный компоненты с настраиваемым весовым коэффициентом. Экспериментальная проверка метода проведена на открытом наборе геопро пространственных данных, преобразованном в текстовый корпус, отражающий типовые сценарии пространственного поиска. Результаты показали, что предложенный гибридный подход демонстрирует улучшение по метрике MAP по сравнению с векторным поиском и значительное превосходство над графовым методом по всем метрикам. При этом значение MRR уступает векторному поиску, что указывает на компромисс между точностью первой позиции и устойчивостью ранжирования в целом. Установлено, что оптимальное соотношение вкладов графового и векторного компонентов позволяет повысить устойчивость ранжирования и полноту ответов при обработке запросов, содержащих координаты и географические наименования. **Практическая значимость:** предложенный метод может быть использован в системах геоинформационного анализа, интеллектуального поиска и автоматической обработки технической документации. Метод обеспечивает интерпретируемость результатов за счет явного представления знаний в виде графа, устойчивость к разнородным данным и адаптивность к различным типам пользовательских запросов. **Обсуждение:** перспективы дальнейших исследований связаны с применением методов обучения без учителя для снижения зависимости от качества разметки, а также с оптимизацией вычислительной эффективности и масштабируемости графовых моделей знаний.

**Ключевые слова** — гибридный поиск, граф знаний, Retrieval-Augmented Generation, GraphRAG, семантический анализ, пространственные данные, геоинформационные системы, координаты, топонимы, генеративные модели искусственного интеллекта.

**Для цитирования:** Менисов А. Б., Нагорный Д. С., Шелест А. Б. Графовый метод расширенного поиска знаний в специализированных текстах, содержащих координаты, географические названия и аббревиатуры. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 2–15. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-2-15, EDN: WDEXZF

**For citation:** Menisov A. B., Nagorny D. S., Shelest A. B. A graph-based method for extended knowledge retrieval from specialized texts containing coordinates, geographical names, and abbreviations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 2–15 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-2-15, EDN: WDEXZF

### Введение

В последние годы модели генеративного искусственного интеллекта достигли значительных успехов в решении задач, связанных с извлечением, интерпретацией и интеграцией знаний из текстовых данных [1]. Их применение распространено в таких областях, как автоматическое аннотирование документов, анализ смысловых связей между фразами и построение интеллектуальных поисковых систем [2]. Однако при работе с текстами, содержащими специализированные типы информации, традиционные методы анализа демонстрируют ряд ограничений [3].

Классические подходы расширенного поиска (Retrieval-Augmented Generation, RAG), объединяющие механизмы работы с базами данных и генерацию ответов языковой моделью, показывают высокую результативность при обработке общих текстов и недоменных запросов [4]. Тем не менее при применении RAG к специализированным корпусам, например текстам, включающим географические координаты, картографические обозначения, топонимы, технические термины или доменные аббревиатуры, возникают сложности и снижение качества обработки [5]. Такие данные часто представлены в структурированной или полуструктурированной форме, что делает их трудными для корректного индекси-

рования и семантической интерпретации традиционными векторными методами поиска. В контексте данной работы под знанием понимается структурированное представление сущностей предметной области, их свойств и взаимосвязей, формируемое в виде графа знаний и используемое для синтеза интерпретируемых ответов на пользовательские запросы.

В ответ на эти вызовы развивается новый класс подходов — GraphRAG (Graph-based Retrieval Augmented Generation) [6]. Их ключевая идея заключается в использовании графов знаний для представления информации в виде узлов (сущностей) и ребер (связей между ними). Такой подход обеспечивает возможность более гибкого и точного поиска, позволяя языковым моделям не только находить нужные фрагменты данных, но и понимать контекст их взаимосвязей.

### Анализ научно-технических работ

GraphRAG-система строится на принципах интеграции графовой структуры знаний с возможностями генеративных языковых моделей, что обеспечивает надежное извлечение и интерпретацию сложной информации, особенно пространственно-временных данных и доменных обозначений [7].

Работа системы начинается с этапа получения информации из различных внешних источников (таблиц, текстов, баз данных), которые могут содержать пространственно-временные параметры (координаты, временные метки, топонимы, технические аббревиатуры).

Далее специализированные процессы (например, преобразователи типа LLMGraphTransformer) анализируют эти данные, выделяют сущности (узлы) и их связи (ребра), например объекты, события, их местоположение и время. Разделение информации по уровням (семантическому, символическому, контекстному) позволяет точно индексировать сложные фрагменты, полуструктурированные записи или неоднозначные обозначения.

Для поиска релевантной информации используются как классические векторные методы [8], так и графовые [9, 10], которые могут динамически извлекать подграфы, соответствующие запросу. Графы знаний предоставляют богатый контекст, например, для поиска информации о событиях в определенный временной период или для выявления связей между аббревиатурами и их расшифровками.

Найденный фрагмент подграфа либо извлеченная последовательность событий или объектов передается в языковую модель, которая ге-

нерирует объяснение, аналитический отчет или структурированный ответ для пользователя.

Можно привести следующие примеры применения:

- в юриспруденции — анализ связей между нормативными документами, судебными прецедентами, законами для поиска и объяснения сложных юридических взаимосвязей, автоматическое составление отчетов по юридическим вопросам [11];

- в бизнес-аналитике — исследование сложных сетей связей между компаниями, технологиями и рынками, включающее временные аспекты трендов и событий, взаимодействие между структурированными (финансовыми) и неструктурированными (новостными) данными [12];

- в медицине — построение графов клинических испытаний, взаимодействий между препаратами и симптомами, анализ пространственно-временных моделей распространения заболеваний или генетических связей [13];

- в образовании и науке — ускорение обработки научных публикаций, поиск скрытых связей между концепциями и исследованиями с учетом времени публикации и географии исследований [14].

Таким образом, GraphRAG эффективно решает задачи поиска и анализа информации в сложных специализированных корпусах, обеспечивая точность, полноту и объяснимость ответа посредством интеграции графовых моделей знаний и генеративных языковых систем. Дополнительно стоит отметить, что для задач, где важно учитывать изменения, например отслеживание хронологии событий или обновлений нормативных актов, используются специальные уровни графов с временной иерархией, что позволяет корректно отличать и объединять факты, относящиеся к разным периодам.

Современные системы информационного поиска и извлечения знаний используют различные уровни обработки текстовой информации, включая архитектурные подходы, модели представления текста и алгоритмы сопоставления. К архитектурным решениям относятся классические системы полнотекстового поиска, а также модели расширенной генерации ответов (RAG) [15], в которых поиск релевантных фрагментов осуществляется с помощью внешнего поискового механизма, а генерация ответа — языковой моделью. Несмотря на высокую эффективность RAG-подходов, их качество существенно зависит от используемого механизма извлечения и ограничено возможностями базовых моделей поиска.

На уровне представления текста широко применяются векторные и псевдовекторные модели, включая TF-IDF [16], эмбединги и др. К числу наиболее эффективных решений относятся мо-

■ **Таблица 1.** Типы данных в специализированных текстах

■ **Table 1.** Data types in specialized texts

Тип данных	Пример	Особенности	Примечание
Координаты	55.7558° N, 37.6176° E	Требует парсинга и геокодирования	Модели не интерпретируют координаты как объект реального мира, не сопоставляют точки
Топонимы	Москва, Лужники	Полисемия, синонимия	Требуется нормализация, разрешение неоднозначности, поиск синонимов
Аббревиатуры	ГИС, ЦОД, ВПП	Требует онтологического словаря	Одно сокращение может иметь 5–10 значений, модели без доменной онтологии их путают
Пространственные описания	В 3 км к северу	Необходима контекстная интерпретация	Нужна интерпретация пространства, а не только текста

дели, использующие механизм токен-уровневого сопоставления [17] и сочетающие преимущества разреженных представлений и нейросетевого обучения.

Однако даже данные модели ориентированы преимущественно на оценку семантической близости текстовых фрагментов и не обеспечивают явного представления структурных и пространственных связей между объектами. В условиях специализированных корпусов, содержащих координаты, географические наименования и доменные аббревиатуры, это приводит к потере пространственной и топологической информации и снижению качества аналитических запросов. Особенностью специализированных текстов является присутствие устойчивых форматов данных, представленных в табл. 1.

Обработка специализированных текстов, содержащих координаты, географические названия и аббревиатуры, представляет собой комплексную задачу, выходящую за рамки чисто лингвистического анализа. Таким образом, проблема носит не лингвистический, а семантико-пространственный характер, что обуславливает необходимость графового подхода, актуальность которого по сравнению с другими подходами определена рядом факторов.

Во-первых, традиционные методы обработки естественного языка демонстрируют ограниченную эффективность при работе с такими данными [18], поскольку:

- координаты требуют точной математической интерпретации и привязки к системе отсчета;

- географические названия образуют сложные иерархические структуры (страна/регион/город) [19];

- аббревиатуры обладают контекстно-зависимой семантикой [20].

Во-вторых, используемые в классических RAG-системах векторные представления (эмбеддинги) формируются на основе анализа совмест-

ной встречаемости терминов, фраз или предложений в контекстном окружении и тем самым аппроксимируют статистико-контекстную близость между текстовыми фрагментами. Такие представления эффективно захватывают обобщенные смысловые ассоциации, однако не кодируют явно типы отношений между объектами, такие как пространственная вложенность, направленность, причинно-следственные или метрические зависимости. В частности, расстояние между векторами отражает вероятность совместного употребления сущностей в сходных контекстах, но не сохраняет информацию о конкретной природе связи, например: «расположен в», «находится на расстоянии», «является частью» или «следует после во времени» [21]. Это ограничение принципиально для задач, связанных с геоинформационным анализом, где пространственные отношения и метрика расстояний должны интерпретироваться детерминированно, а не вероятностно [22].

В-третьих, специализированные тексты формируют сложные системы связей, которые могут быть представлены в виде многоуровневой структуры (табл. 2).

■ **Таблица 2.** Типы связей в специализированных текстах

■ **Table 2.** Types of connections in specialized texts

Тип сущности	Тип связи	Характер связи
Объекты и геолокации	Пространственные	Метрические отношения, вложенность
Термины и аббревиатуры	Онтологические	Иерархические, синонимические
События и временные интервалы	Причинно-временные	Последовательности, зависимости
Названия и координаты	Сопоставительные	Тождество, эквивалентность

В-четвертых, стандартный полнотекстовый поиск не реконструирует такие связи, что ведет к потере смысловых цепочек и контекстных зависимостей и пропуску критически важных фактов, а также некорректным ответам на аналитические запросы [23].

Графовая модель позволяет строить семантические и топологические контуры знаний, что особенно важно для систем аналитической обработки данных и обеспечивает:

- возможность проследить путь от исходных данных к результату;
- проверяемость фактов, которые могут быть верифицированы по исходным данным;
- соответствие стандартам и процедурам принятия решений.

Таким образом, для информационных систем эти характеристики являются обязательными требованиями, а не опциональными преимуществами. GraphRAG-подход является не просто альтернативой, а наиболее рациональным решением для интеграции геоданных, терминологических цепочек и семантического анализа текстов. Это обусловлено фундаментальными ограничениями векторных представлений [24] и необходимостью сохранения структурной целостности пространственно-семантических данных [25].

### Формализованная постановка задачи

Пусть задан корпус текстов  $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ , относящихся к специализированной предметной области (например, геодезия, логистика, топография). Каждый документ  $d_i$  содержит неструктурированную текстовую информацию, включающую упоминания географических координат, названий, аббревиатур и иных именованных сущностей.

Задача заключается в построении семантико-пространственной модели знаний в виде графа  $G = (V, E)$ , где  $E$  – множество ребер, отражающих связи между сущностями. Ребро  $e_{ij}$  между вершинами  $v_i$  и  $v_j$  существует, если выполняются условия, определяемые функциями близости;  $V$  – множество вершин, представляющих собой извлеченные и нормализованные сущности. Каждая сущность  $v \in V$  определяется как результат применения последовательности функций извлечения к корпусу  $D$ :

$$v = f(d) = \text{NER}(d) \cup \text{GeoParse}(d) \cup \text{AbbrevResolve}(d), \quad (1)$$

где  $\text{NER}(d)$  – множество стандартных именованных сущностей (персоны, организации, локация);  $\text{GeoParse}(d)$  – множество географических объектов, извлеченных из текстовых описаний

и координат;  $\text{AbbrevResolve}(d)$  – множество расшифрованных аббревиатур и терминов.

Последовательности функций извлечения и нормализации сущностей включают несколько этапов, реализуемых с использованием стандартных и открыто доступных методов обработки естественного языка и геоданных.

Извлечение стандартных именованных сущностей (множество  $\text{NER}(d)$ ) проводится с применением моделей распознавания именованных сущностей на основе трансформерных архитектур и дообученных на специализированных данных. В экспериментальной реализации использовались модели класса BERT/roBERTa, доступные в библиотеке spaCy.

Извлечение географических объектов (множество  $\text{GeoParse}(d)$ ) выполняется посредством комбинации правил регулярных выражений для распознавания координатных форматов и процедур геокодирования, обеспечивающих приведение координат и топонимов к унифицированному представлению.

Расшифровка аббревиатур и терминов (множество  $\text{AbbrevResolve}(d)$ ) реализуется на основе словаря, формируемого автоматически из корпуса текстов и дополняемого внешними источниками. Каждая аббревиатура нормализуется путем сопоставления с ее полной формой, после чего добавляется в граф знаний как отдельная сущность.

Все используемые функции извлечения и нормализации реализуются в виде модульных компонентов и могут быть воспроизведены с использованием открытых программных библиотек, что обеспечивает воспроизводимость предложенного подхода.

На основе построенного графа  $G$  необходимо синтезировать механизм поиска ответов  $A(q, G)$  на пользовательский запрос  $q$ , принадлежащий некоторому распределению запросов  $Q$ . Целью является максимизация релевантности ответа механизма эталонному ответу  $y_q$ :

$$E(\text{Rel}(A(q, G), y_q)) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $\text{Rel}$  – выбранная метрика релевантности (например, BLEU, ROUGE, Mean Reciprocal Rank, MRR); пользовательский запрос  $q \in Q$  представляет собой текстовый запрос на естественном языке, содержащий указание на сущности предметной области и их взаимосвязи.

Запрос может включать пространственные условия (радиус, направление, расстояние), указание на конкретные объекты или контрольные точки.

Примерами пользовательских запросов являются: «Найти объекты в радиусе 2 км от КП 45», «Связь между КП 44 и выходами ПГС в районе р. Быстрая».

## Описание метода

Предлагаемый метод расширенного поиска знаний состоит из трех последовательных этапов.

Этап 1. *Извлечение и нормализация сущностей.*

Извлечение и нормализация сущностей выполняются с использованием комбинации открытых лингвистических моделей, доменных словарей и правил постобработки. На этом этапе происходит пополнение множества вершин графа  $V$ :

– для извлечения стандартных именованных сущностей (персоны, организации, географические наименования) применяются предварительно обученные модели распознавания именованных сущностей (NER), доступные в открытых библиотеках обработки естественного языка (например, spaCy). В качестве базовых моделей используются трансформерные архитектуры, дообученные на специализированных текстах предметной области;

– географические объекты и координатная информация извлекаются с применением процедур геопарсинга, включающих распознавание координатных форматов, топонимов и пространственных указаний, с последующей нормализацией к унифицированному представлению (для этих целей используются открытые геоинформационные словари и библиотеки геокодирования, такие как GeoNames и GeoPy). Дополнительно производится геокодирование координат в унифицированное представление:

$$g = \text{GeoNorm}(c, s, r), \quad (3)$$

где  $g$  – нормализованное географическое представление;  $c$  – исходное географическое представление, извлеченное из текста (координаты, топонимы, текстовые пространственные описания);  $s$  – система координат и единицы измерения;  $r$  – пространственное разрешение (точность) нормализации;

– нормализация терминов и расшифровка аббревиатур осуществляются на основе доменных словарей, формируемых из корпуса документов и дополняемых внешними открытыми источниками. В процессе нормализации различные лексические формы, синонимы и сокращения приводятся к каноническому виду, после чего соответствующие сущности добавляются в множество вершин графа.

Этап 2. *Формирование графа знаний.* Ребра графа  $E$  формируются на основе гибридного подхода, комбинирующего пространственную и семантическую близость:

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{dist}(v_i, v_j) < \varepsilon - \\ & \text{пространственный критерий;} \\ 1, & \text{если } \text{sim}(h_i, h_j) > \tau - \text{семантический} \\ & \text{критерий;} \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\text{dist}(v_i, v_j)$  – геодезическое расстояние между географическими координатами сущностей  $v_i$  и  $v_j$ , вычисляемое с использованием формулы гаверсинусов для сферической модели Земли;  $h_i$  и  $h_j$  – векторные представления сущностей, полученные с помощью предварительно обученной языковой модели (например, Sentence-BERT [26]);  $\text{sim}(h_i, h_j)$  – косинусное сходство соответствующих векторов;  $\varepsilon$  – порог пространственной близости, выраженный в метрах;  $\tau$  – порог семантической близости [27].

Ребро между вершинами графа создается только в том случае, если выполняются условия пространственной и семантической близости, что позволяет исключить семантически сходные, но географически удаленные сущности, а также пространственно близкие, но тематически несвязанные объекты [28].

При формировании ребер графа каждому ребру сопоставляется тип близости (пространственный, семантический или гибридный). Данная информация сохраняется в графе и используется на этапе поиска и интерпретации результатов. На рис. 1 представлен пример формирования графа по следующим дан-

```
[ {
  «id»: «doc_001»,
  «text»: «Установка КП 45 в точке 55.755831,
37.617673. Рельеф: всхолмленная равнина с ПГС.
Смещение относительно КП 44 – 125 м по азимуту 45°.»
},
{
  «id»: «doc_002»,
  «text»: «Обследование района р. Быстрая.
Координаты базового лагеря: 54.1234, 38.5678.
Обнаружены выходы ПГС в 2 км к северу от
КП 45.»
},
{
  «id»: «doc_003»,
  «text»: «Маршрутная съемка от КП 44
до КП 45. Зафиксированы точки с координатами
55.750000, 37.620000. Ландшафт: холмистая
местность с преобладанием ПГС.»
},
{
  «id»: «doc_004»,
```

```

    «text»: «Геодезические работы в районе
перевала Северный. Установлен КП 46 на высоте
1250 м. Координаты: 55.800000, 37.600000.»
  },
  {
    «id»: «doc_005»,
    «text»: «В районе р. Быстрая обнаружен
КП. Координаты: 54.0000, 38.0000»
  }

```

В процессе нормализации пространственных описаний дополнительно формируются служебные пространственно-семантические сущности (например, «в районе»), используемые для привязки событий и объектов к географическому контексту. Такие узлы маркируются префиксом *geo\_* и отличаются от именованных географических объектов (река, перевал, населенный пункт).

Следует отметить, что на рис. 1 представлен упрощенный фрагмент графа знаний, сфокусированный на координатных и контрольных точках. Географические объекты, такие как река Быстрая и перевал Северный, извлекаются системой и присутствуют в полном графе, однако опущены на рисунке для повышения наглядности. Пространственные параметры, выраженные в текстах в виде расстояний, направлений и высот (например, «125 м по азимуту 45°», «в 2 км к северу», «на высоте 1250 м»), используются при формировании пространственных связей между

сущностями и сохраняются в виде атрибутов ребер графа.

На рис. 2 представлен результат анализа сформированного графа знаний с использованием нормализованных метрик центральности вершин (степени, по посредничеству) и важности узла (по аналогу с метрикой PageRank [29]), позволяющих количественно оценить структурную роль и значимость сущностей в графе [30]. Анализ центральности используется как инструмент интерпретации структуры графа знаний, выявления ключевых сущностей и оценки их влияния на распространение информации в графе.

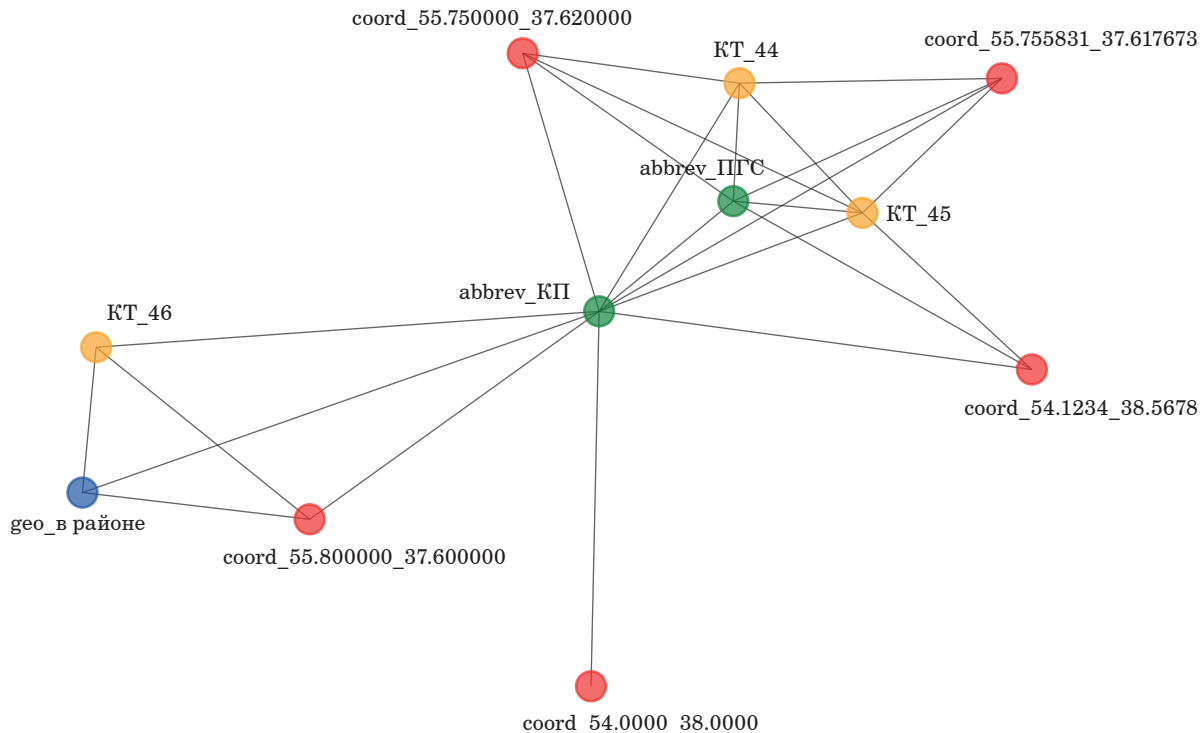
В рамках анализа использовались стандартные метрики центральности графов. В частности, степенная центральность (degree) вершины  $v_i$  определяется как

$$C_d(v_i) = \frac{\deg(v_i)}{V-1}, \quad (5)$$

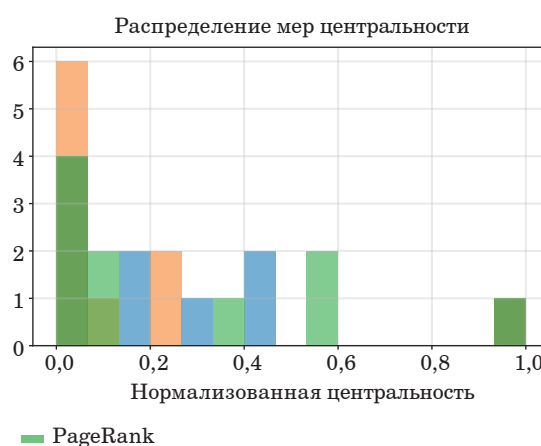
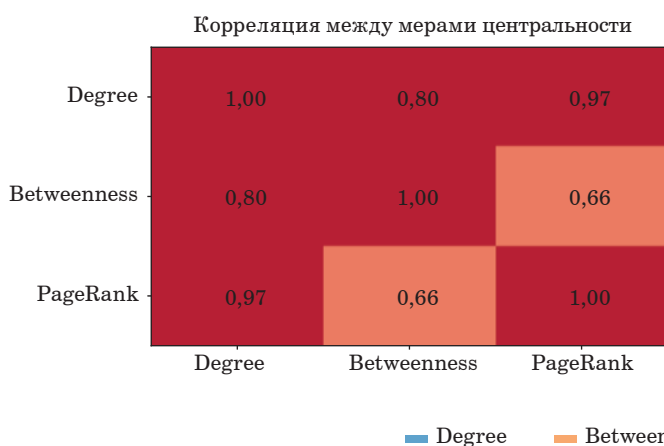
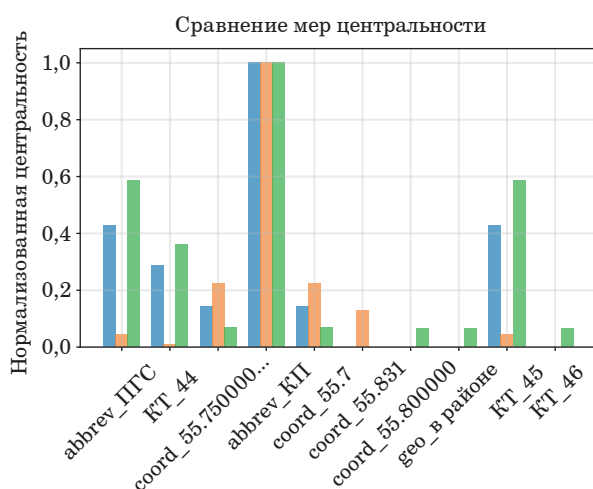
где  $\deg(v_i)$  – количество ребер вершины  $v_i$ ;  $V$  – общее число вершин в графе. Нормализация делением на  $V - 1$  обеспечивает диапазон значений  $C_d \in [0, 1]$ .

Метрика центральности по посредничеству (betweenness) измеряется как

$$C_b(v_i) = \frac{1}{(V-1)(V-2)} \sum_{v_j \in V, j \neq i \neq k} \frac{\sigma_{jk}(v_i)}{\sigma_{jk}}, \quad (6)$$



■ **Рис. 1.** Пример формирования графа знаний: *КТ* – контрольная точка  
 ■ **Fig. 1.** An example of knowledge graph construction: *КТ* – checkpoint



■ **Рис. 2.** Анализ графа знаний  
 ■ **Fig. 2.** Knowledge graph analysis

где  $\sigma_{jk}$  — количество кратчайших путей между вершинами  $v_k$  и  $v_i$  в графе;  $\sigma_{jk}(v_i)$  — количество таких путей, проходящих через вершину  $v_i$ . Нормализация  $(V - 1)(V - 2)$  позволяет масштабировать значения в диапазон  $[0, 1]$ .

Важность узла графа:

$$C_{pr}(v_i) = (1 - d) + d \sum_{v_j \in N(v_i)} \frac{1}{\deg(v_j)}, \quad (7)$$

где  $d$  — дампинг-фактор;  $N(v_i)$  — множество соседних вершин;  $\deg(v_j)$  — степень вершины  $v_j$ . Результаты нормализуются так, чтобы сумма всех  $C_{pr}(v_i)$  равнялась 1.

Этап 3. Гибридный механизм поиска. Для обработки запроса  $q$  используется комбинированная стратегия, объединяющая структурные возможности графа знаний и семантические свойства векторных представлений. Данный этап обеспечивает ранжирование документов и сущ-

ностей с учетом их смысловой близости к запросу и их структурной значимости в графе знаний.

Пользовательский запрос  $q$  приводится к унифицированному виду с использованием процедур предварительной обработки текста, аналогичных применяемым для корпуса документов. В результате формируются множество сущностей запроса  $V_q \subset V$  и векторное представление запроса  $q \in R^2$ .

Графовый компонент поиска основан на анализе структуры графа знаний  $G = (V, E)$ . Для каждой сущности  $v_i \in V_q$  выполняется поиск релевантных вершин графа, связанных с запросом через кратчайшие пути.

При этом для оценки структурной роли и значимости сущностей используются нормализованные метрики центральности:

- степенная центральность (5), характеризующая локальную связанность сущности;
- центральность по посредничеству (6), отражающая роль сущности как структурного посредника;

– метрика важности узла (7), учитывающая глобальное положение сущности в графе.

На их основе для каждой вершины вычисляется интегральная структурная центральность

$$C_s(v_i) = \alpha_1 \cdot C_d(v_i) + \alpha_2 \cdot C_b(v_i) + \alpha_3 \cdot C_{pr}(v_i) \quad (8)$$

при  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \geq 0$  и  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ .

Для информации, ассоциированной с вершиной  $v_i$ , графовая оценка релевантности запросу GraphSearch определяется как

$$\text{GraphSearch}(q) = \frac{1}{|V|} \sum_{v_i \in V} \max_{v_i \in V} \left( \frac{C_s(v_i)}{1 + \text{dist}(v_i, v_q)} \right), \quad (9)$$

где  $\text{dist}(v_i, v_q)$  – длина кратчайшего пути между сущностями документа  $v_i$  и сущностями запроса  $v_q$ .

Таким образом, больший вклад в итоговую оценку получают сущности, которые одновременно структурно значимы в графе и находятся на малом расстоянии от сущностей запроса.

Параллельно выполняется векторный поиск в семантическом пространстве. Для оценки семантической близости между запросом и документами используется метод плотных векторных представлений текста [31]. Каждый текстовый запрос  $q$  и документ  $d$  кодируются в векторное пространство фиксированной размерности с использованием модели трансформерных эмбедингов. Для каждой информации вычисляется мера семантического сходства

$$\text{VectorSearch}(q) = \text{sim}(E(q), E(d)), \quad (10)$$

где  $E(q)$  – эмбединг запроса;  $E(d)$  – эмбединг документа;  $\text{sim}(\ )$  – косинусная мера сходства между векторами.

Полученные значения используются для ранжирования документов по убыванию семантической близости к запросу [32]. Поиск ближайших соседей выполняется посредством алгоритма k-ближайших соседей. Для каждого запроса вычисляется косинусное сходство между эмбедингом запроса и эмбедингами всех документов коллекции, после чего выбираются  $K$  документов с максимальным значением меры сходства.

Итоговая оценка определяется как взвешенная комбинация графовой и векторной оценок:

$$A(q) = \lambda \cdot \text{GraphSearch}(q) + (1 - \lambda) \cdot \text{VectorSearch}(q), \quad (11)$$

где параметр  $\lambda \in [0, 1]$  регулирует вклад каждого из типов поиска.

Таким образом, VectorSearch выявляет скрытые семантические связи между запросом и документами, а GraphSearch позволяет учитывать

явные структурные, пространственные и топологические связи между сущностями. Гибридный механизм поиска объединяет преимущества обоих подходов, усиливая релевантность для запросов, содержащих как семантические, так и структурно-координатные зависимости.

### Экспериментальное исследование

Для оценки качества предложенного метода использовался корпус текстов с географическими сущностями и привязками к координатам Tesla Supercharge Locations Globally (<https://www.kaggle.com/datasets/omarsobhy14/supercharge-locations>), содержащий около 6000 записей, каждая из которых соответствует одной точке сети зарядной инфраструктуры. Каждый объект описывается координатами (широта, долгота), топонимической привязкой (город, регион, страна), а также дополнительными атрибутами, такими как идентификатор станции и тип локации. Несмотря на то, что этот корпус текстов изначально не предназначен для задач информационного поиска или ранжирования документов, его структура позволяет сформировать коллекцию текстовых описаний объектов инфраструктуры, которые могут использоваться как документы в задаче семантического поиска.

В рамках эксперимента рассмотрены следующие методы поиска:

1) векторный поиск (Vector) – семантический поиск в векторном пространстве на основе современных эмбедингов (модель E5, <https://huggingface.co/intfloat/multilingual-e5-base>) с использованием косинусной меры сходства;

2) графовый поиск (Graph) – поиск по графу знаний, построенному в соответствии с формулой (9), с учетом пространственных связей и структурной важности вершин, определяемой нормализованными метриками центральности (коэффициенты подбирались эмпирически на валидационной выборке путем перебора с шагом 0,1 с максимизацией значения метрики MAP);

3) гибридный поиск (Hybrid) – предложенный метод, реализующий линейную комбинацию результатов графового и векторного поиска согласно формуле (11).

Все методы использовали единый корпус документов и одинаковый набор запросов, что обеспечивало корректность сравнительного анализа. Для оценивания качества метода был сформирован набор запросов на русском языке, отражающих типовые сценарии взаимодействия с системой поиска информации о зарядных станциях Tesla, включая поиск объектов в заданной географической области, поиск ближайших объектов к указанным координатам и запросы, со-

держащие топонимы и пространственные ограничения в неявной форме. Запросы моделируют реальные пользовательские формулировки и используют различные лексические формы, географические указания и синонимы (например, «найти зарядные станции Tesla в Германии», «суперчарджеры рядом с Берлином», «сеть зарядных станций Tesla в Калифорнии»).

Поскольку корпус текстов содержит структурированные географические атрибуты, эталонная релевантность документов определялась автоматически на основе этих полей. Для каждого тестового запроса формировалось множество документов, удовлетворяющих соответствующему условию. Например, для запроса «найти зарядные станции Tesla в Германии» релевантными считаются все записи, у которых поле Country = Germany. Таким образом создается тестовая выборка, проверяющая способность системы находить релевантные документы.

Качество поиска оценивалось с использованием стандартных метрик ранжирования [33, 34]:

- средний обратный ранг первого релевантного ответа (Mean Reciprocal Rank, MRR);

- доля релевантных документов среди первых  $k$  результатов (в эксперименте  $k = 5$  – Precision@k);

- средняя точность всех ответов (Mean Average Precision, MAP).

Данные метрики позволяют оценить как позицию первого релевантного документа, так и общее качество ранжирования поисковой выдачи. Дополнительно добавлены доверительные интервалы, рассчитанные методом бутстрап (<https://wiki.loginom.ru/articles/bootstrap.html>) с 1000 повторов на уровне доверия 95 %. Такой подход позволяет оценить устойчивость результатов и отражает статистическую вариативность метрик, приведенных в табл. 3.

Как видно из таблицы, гибридный метод демонстрирует улучшение качества ранжирования

■ **Таблица 3.** Сравнительные результаты методов поиска по различным метрикам

■ **Table 3.** Comparative retrieval performance across metrics

Метод	MRR	Precision@5	MAP
Векторный поиск (Vector)	0,590 [0,200; 1,000]	0,320 [0,040; 0,680]	0,110 [0,002; 0,297]
Графовый поиск (Graph)	0,186 [0,000; 0,600]	0,198 [0,000; 0,600]	0,013 [0,000; 0,037]
Предложенный метод (Hybrid)	0,464 [0,067; 0,867]	0,324 [0,040; 0,680]	0,129 [0,000; 0,357]

по сравнению с отдельным графовым и векторным поиском, при этом доверительные интервалы показывают, что различия статистически устойчивы.

Анализ полученных результатов выявил, что эффективность графового поиска ограничена, что обусловлено неполнотой и разреженностью связей. Векторный поиск обеспечивает высокое качество за счет семантической близости текстов, однако игнорирует явные пространственные и структурные зависимости между сущностями.

Доверительные интервалы показывают высокую вариативность из-за небольшого числа тестовых запросов, но общий тренд иллюстрирует, что графовый поиск добавляет улучшение в ранжировании топ-кандидатов, а векторная модель обеспечивает базовую семантическую релевантность.

Предложенный метод сочетает преимущества обоих подходов и представляет наилучшие значения метрики MAP, что указывает на более устойчивое качество ранжирования по всему списку результатов. Повышение Precision@5 по сравнению с графовым методом подтверждает эффективность интеграции семантического компонента, а рост MAP относительно векторного поиска свидетельствует о положительном вкладе графовой структурной информации.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить особенности применения векторного, графового и гибридного методов поиска при обработке специализированных геопропространственных запросов на русскоязычном корпусе.

## Обсуждение

Результаты показали, что чисто графовый подход демонстрирует наименьшие значения метрик качества (MRR = 0,186; Precision@5 = 0,198; MAP = 0,013). Это объясняется ограниченной структурной насыщенностью графа знаний, сформированного на основе рассматриваемого корпуса, так как большинство сущностей обладает малой степенью связности, а расстояния между ними слабо дифференцированы, что снижает способность структурных метрик центральности и путей.

Векторный поиск на основе модели E5 обеспечивает высокие показатели ранжирования (MRR = 0,59; Precision@5 = 0,32; MAP = 0,11), выступая в роли сильного базового решения. Это подтверждает, что современные мультязычные бинкодеры эффективно определяют семантическое сходство даже в специализированных текстах, содержащих координаты и топонимы, при условии относительно простой структуры запросов.

Наиболее показательные результаты получены для гибридного подхода, объединяющего

векторный и графовый поиск с адаптивным весовым коэффициентом. Несмотря на некоторое снижение MRR по сравнению с чисто векторным методом (0,464 против 0,59), гибридная модель существенно превосходит векторный поиск по метрике MAP (0,129 против 0,110), что свидетельствует о более качественном ранжировании релевантных документов на протяжении всей выдачи, а не только в первой позиции. При этом значение Precision@5 для гибридного метода (0,32) соответствует векторному базису, что указывает на отсутствие деградации качества верхней части списка результатов.

Данный эффект объясняется тем, что графовый компонент в гибридной архитектуре выполняет роль структурного регуляризатора, усиливая вклад документов, содержащих сущности, топологически близкие к сущностям запроса и обладающие высокой структурной значимостью в графе знаний. Использование нормализованных метрик центральности вершин (степени, посредничества и аналогов PageRank) позволило количественно учитывать роль сущностей в общей структуре знаний, что особенно важно при обработке пространственно ориентированных запросов.

Дополнительный анализ показал, что ключевым фактором успешности гибридного подхода является адаптивный характер интеграции графового и векторного компонентов. Введение весового коэффициента, зависящего от уверенности векторного поиска и наличия пространственных маркеров в запросе, позволило избежать негативного влияния графа в случаях, когда структурные связи выражены слабо, и, напротив, усилить его вклад для запросов, требующих пространственно-структурной интерпретации. Оптимальное значение весового коэффициента, определяющего вклад графового поиска в итоговую функцию релевантности (11), составляет 0,6. Это указывает на доминирующую роль структурно-пространственных связей при обработке запросов, содержащих координаты и топонимы, при сохранении значимого вклада семантического поиска.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что гибридные методы поиска не предназначены для прямой замены сильных векторных моделей на слабо структурированных корпусах, однако они обеспечивают более устойчивое и интерпретируемое ранжирование, особенно в сценариях, где релевантность определяется не только семантическим сходством, но и пространственными и реляционными связями между сущностями. Это делает предложенный подход перспективным для применения в системах геоинформационного анализа и интеллектуального поиска по специализированным техническим документам.

Несмотря на полученные положительные результаты, проведенное исследование имеет два направления ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации выводов.

Первое направление ограничений заключается в следующем: качество гибридного поиска в значительной степени зависит от точности этапов извлечения и нормализации сущностей, а также от корректности геокодирования. Ошибки на этих этапах приводят к искажению структуры графа знаний и, как следствие, к снижению эффективности графового компонента. В работе данные процессы рассматривались как заданные, без отдельного анализа их устойчивости к шуму и пропущенным сущностям.

Для второго направления выделяется, что подбор параметров гибридной модели, включая весовой коэффициент интеграции графового и векторного поиска, осуществлялся эмпирически и не опирался на формальную процедуру оптимизации. Это оставляет пространство для дальнейшего улучшения качества за счет применения методов автоматического подбора гиперпараметров или обучения параметров интеграции в рамках единой оптимизационной задачи.

В качестве направлений дальнейших исследований представляется перспективным расширение корпуса за счет реальных пользовательских запросов и документов из различных прикладных областей, что позволит более полно оценить устойчивость предложенного метода.

## Заключение

В работе предложен и экспериментально проверен гибридный графовый метод для расширенного поиска знаний в специализированных текстах, обогащенных координатами, географическими названиями и аббревиатурами. Разработанный метод сочетает извлечение и нормализацию сущностей, построение графа на основе пространственных и семантических связей и гибридный алгоритм поиска, комбинирующий графовые и векторные техники. Такое сочетание позволяет повысить качество ответа больших языковых моделей при работе с узкоспециализированными корпусами, сохраняя при этом преимущества генеративных архитектур искусственного интеллекта.

Проведенные эксперименты показали, что предложенный гибридный подход эффективно сочетает преимущества графовых и векторных методов, обеспечивая высокие показатели качества при сохранении вычислительной эффективности. Полученные результаты подтверждают жизнеспособность и практическую применимость метода в задачах семантического поиска и анали-

за пространственно ориентированных данных. Кроме того, выявленные зависимости и ограничения формируют основу для дальнейшего совершенствования архитектуры, направленного на повышение точности и адаптивности системы.

Основные преимущества метода: интерпретируемость результатов, устойчивость к разнородным данным и адаптивность — делают его перспективным для внедрения в системах анализа документов для геодезии, картографии, логистики и оборонного комплекса. Интерпретируемость результатов обеспечивается возможностью явной трассировки путей в графе знаний от исходных сущностей к итоговому ответу. Устойчивость к разнородным данным достигается за счет раз-

дельной обработки текстовых, координатных и терминологических компонентов. Адаптивность метода обеспечивается гибридной схемой поиска с настраиваемым вкладом графовых и векторных механизмов.

Направлениями для будущих исследований являются снижение зависимости от качества разметки за счет применения методов обучения без учителя; оптимизация вычислительной эффективности для работы с эксабайтными корпусами данных; реализация механизма инкрементального обновления графа, позволяющего снижать вычислительные затраты при добавлении новых данных.

## Литература

1. Grace K., Sandkühler J. F., Stewart H., Weinstein-Raun B., Thomas S., Stein-Perlman Z., Salvatier J., Brauner J., Korzekwa R. C. Thousands of AI authors on the future of AI. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2025, vol. 84, Article 9. doi:10.1613/jair.1.19087
2. Radanliev P. Artificial intelligence: Reflecting on the past and looking towards the next paradigm shift. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2024, vol. 37, no. 7, pp. 1045–1062. doi:10.1080/0952813X.2024.2323042
3. Vijayakumaran S., Vimaladevi M., Thangamani R., Vibeesh N., Easwaramoorthy S. V. Revolutionizing legal access: An AI-Driven RAG chatbot for real-time judicial insights. *2025 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA)*, IEEE, 2025, pp. 1–6. doi:10.1109/AIMLA36882.2025.11040439
4. Kim J., Hur M., Min M. From RAG to QA-RAG: Integrating generative AI for pharmaceutical regulatory compliance process. *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2025, pp. 1293–1295. doi:10.1145/3672608.3707749
5. Peng Z., Kuai X., Ke S., Dong X., Guo R. Enhancing geodatabases operability: Advanced human-computer interaction through RAG and Multi-Agent Systems. *Big Earth Data*, 2025, vol. 9, no. 2, pp. 217–242. doi:10.1080/20964471.2025.2483541
6. Barry M., Caillaut G., Halftermeyer P., Qader R., Mouayad M., Le Deit F., Cariolaro D., Gesnouin J. GraphRAG: Leveraging graph-based efficiency to minimize hallucinations in LLM-driven RAG for finance data. *Proceedings of the Workshop on Generative AI and Knowledge Graphs (GenAIK)*, 2025, pp. 54–65.
7. Yang R., Xue H., Razzak I., Hacid H., Salim F. D. KG-IRAG: A knowledge graph-based iterative retrieval-augmented generation framework for temporal reasoning. *arXiv preprint*, 2025. doi:10.48550/arXiv.2503.14234
8. Шалагин Н. Д. Обзор алгоритмов семантического поиска по текстовым документам. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 9, pp. 11–21.
9. Procko T. T., Ochoa O. Graph retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *2024 Conference on AI, Science, Engineering, and Technology (AIxSET)*, Laguna Hills, CA, USA, 2024, pp. 166–169. doi:10.1109/AIxSET62544.2024.00030
10. Никольский Д. Р., Барабанов В. Ф., Гребенникова Н. И., Коваленко С. А., Нужный А. М. Анализ графовых систем управления базами данных. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2023, т. 19, № 6, с. 13–20. doi:10.36622/VSTU.2023.19.6.002, EDN: RFOQQE
11. Dang D. V., Nguyen H., Le T. T., Do H., Nguyen H., Ngo H. Q., Nguyen H. D. Knowledge graph-based legal query system with LLM and retrieval augmented generation. *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems: Proceedings*, Springer, Singapore, 2025, pp. 161–172. doi:10.1007/978-981-96-5881-7\_13
12. Pattabiraman K., Sachin A., Lokeshkumar R. Enhancing business intelligence through NLP and contextual AI synergy. *Engineering Research Express*, 2025, vol. 7, no. 2, Article 025279. doi:10.1088/2631-8695/add9e6
13. Wu J., Zhu J., Qi Y., Chen J., Xu M., Menolascina F., Jin Y., Grau V. Medical graph RAG: Evidence-based medical large language model via graph retrieval-augmented generation. *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*, 2025, pp. 28443–28467. doi:10.18653/v1/2025.acl-long.1381
14. Yang R., Yang B., Zhao X., Gao F., Feng A., Ouyang S., Blum M., She T., Jiang Y., Lecue F., Lu J., Li I. Graphusion: A RAG framework for scientific knowledge graph construction with a global perspective. *Companion Proceedings of the ACM on Web*

- Conference 2025*, 2025, pp. 2579–2588. doi:10.1145/3701716.3717821
15. **Arslan M., Ghanem H., Munawar S., Cruz C.** A survey on RAG with LLMs. *Procedia Computer Science*, 2024, vol. 246, pp. 3781–3790. doi:10.1016/j.procs.2024.09.178
  16. **Zhou H.** Research of text classification based on TF-IDF and CNN-LSTM. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2022, vol. 2171, no. 1, Article 012021. doi:10.1088/1742-6596/2171/1/012021
  17. **Dai B., Shen X., Wang J.** Embedding learning. *Journal of the American Statistical Association*, 2022, vol. 117, no. 537, pp. 307–319. doi:10.1080/01621459.2020.1775614
  18. **Вицентий А. В., Диковицкий В. В., Шишаев М. Г.** Технология извлечения и визуализации пространственных данных, полученных при анализе текстов. *Труды Кольского научного центра РАН*, 2020, т. 11, № 8–11, с. 115–119. doi:10.37614/2307-5252.2020.8.11.012, EDN: YLXXHN
  19. **Syed M. A., Arsevska E., Roche M., Teisseire M.** GeospatRE: Extraction and geocoding of spatial relation entities in textual documents. *Cartography and Geographic Information Science*, 2023, vol. 52, no. 3, pp. 221–236. doi:10.1080/15230406.2023.2264753
  20. **Рязанова В. А.** Множественная трактовка сложных слов в эквивалентных словосочетаниях. *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Филология. Теория языка. Языковое образование*, 2021, № 3 (43), с. 143–148. doi:10.25688/2076-913X.2021.43.3.15
  21. **Klemmer K., Rolf E., Robinson C., Mackey L., Rußwurm M.** Satclip: Global, general-purpose location embeddings with satellite imagery. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2025, vol. 39, no. 4, pp. 4347–4355. doi:10.1609/aaai.v39i4.32457
  22. **Cao K., Zhou C., Church R., Li X., Li W.** Revisiting spatial optimization in the era of geospatial big data and GeoAI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, vol. 129, Article 103832. doi:10.1016/j.jag.2024.103832
  23. **Zhang J., Fang J., Zhang C., Zhang W., Ren H., Xu L.** Geographic named entity matching and evaluation recommendation using multi-objective tasks: A study integrating a large language model (LLM) and retrieval-augmented generation (RAG). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2025, vol. 14, no. 3, p. 95. doi:10.3390/ijgi14030095
  24. **Coelho J., Magalhães J., Martins B.** Improving neural models for the retrieval of relevant passages to geographical queries *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, 2021, pp. 268–277. doi:10.1145/3474717.3483960
  25. **Абрамович Р. К., Добрынин В. Ю., Платонов А. В.** Объединение глубоких моделей и разреженных представлений в информационном поиске: обзор и анализ современных подходов. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2025, № 2 (38), с. 5–17. doi:10.25729/ESI.2025.38.2.001, EDN: HRDWSX
  26. **Chu Y., Cao H., Diao Y., Lin H.** Refined SBERT: Representing sentence BERT in manifold space. *Neurocomputing*, 2023, vol. 555, Article 126453. doi:10.1016/j.neucom.2023.126453
  27. <https://huggingface.co/sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2> (дата обращения: 15.11.2025).
  28. **Казакова Е. Д.** Анализ точности актуальных алгоритмов определения сообществ в сетях при работе с графовыми базами данных. *Computational Nanotechnology*, 2023, т. 10, № 1, с. 49–59. doi:10.33693/2658-3329-2023-10-1-49-59, EDN: WWHRVH
  29. **Yang M., Yang M., Wang H., Wei Z., Wang S., Wen J. R.** Efficient algorithms for personalized PageRank computation: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2024, vol. 36, no. 9, pp. 4582–4602. doi:10.1109/TKDE.2024.3376000
  30. **Lu X., Wu J., Yuan J.** Optimizing reciprocal rank with bayesian average for improved next item recommendation. *Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2023, pp. 2236–2240. doi:10.1145/3539618.3592033
  31. **Citarella A. A., Barbella M., Ciobanu M. G., De Marco F., Di Biasi L., Tortora G.** Assessing the effectiveness of ROUGE as unbiased metric in Extractive vs. Abstractive summarization techniques. *Journal of Computational Science*, 2025, vol. 87, Article 102571. doi:10.1016/j.jocs.2025.102571
  32. **Sumithmon K. S., Shajan R.** Evaluating similarity measures in collaborative filtering: Insights into accuracy, precision, and computational performance. *Georgian Education Mine*, St. George's College Aruvithura, 2024, vol. 4, no. 1, pp. 99–108.
  33. **Bellogin A., Castells P., Cantador I.** Precision-oriented evaluation of recommender systems: An algorithmic comparison. *Proceedings of the Fifth ACM Conference on Recommender Systems*, 2011, pp. 333–336. doi:10.1145/2043932.2043996
  34. **Jeunen O., Potapov I., Ustimenko A.** On (normalised) discounted cumulative gain as an off-policy evaluation metric for top-n recommendation. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2024, pp. 1222–1233. doi:doi.org/10.1145/3637528.36716

UDC 004.891

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-2-15

EDN: WDEXZF

**A graph-based method for extended knowledge retrieval from specialized texts containing coordinates, geographical names, and abbreviations**A. B. Menisov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-9955-2694, vka@mil.ruD. S. Nagorny<sup>a</sup>, Lecturer, orcid.org/0009-0008-5867-0011A. B. Shelest<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0009-1944-0229<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskiy Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Current methods of advanced knowledge retrieval demonstrate limited effectiveness when processing specialized texts containing coordinates, toponyms, and abbreviations, as such data requires simultaneous consideration of semantic and spatial-structural dependencies. Traditional vector approaches focus primarily on generalized semantic proximity and poorly capture explicit spatial relationships between entities, which reduces the accuracy of search in specialized corpora. **Purpose:** To develop a method for semantic search in specialized texts containing coordinates, toponyms, and abbreviations by integrating spatial-structural information into the process of advanced knowledge retrieval. **Results:** We propose a hybrid architecture that combines entity extraction and normalization, knowledge graph construction based on spatial and semantic proximity, and a hybrid search algorithm combining graph and vector components with a configurable weighting coefficient. We have conducted experimental validation of the method on an open geospatial dataset converted into a text corpus reflecting typical spatial search scenarios. The research proofs that the proposed hybrid approach demonstrates an improvement in the MAP metric as compared to vector search and significant superiority over the graph method for all metrics. However, the MRR value is inferior to vector search, indicating a trade-off between the accuracy of the first position and the stability of the overall ranking. We have established that the optimal ratio of the contributions of the graph and vector components allows increased ranking stability and response completeness when processing queries containing coordinates and geographic names. **Practical relevance:** The proposed method can be used in geoinformation analysis systems, intelligent search, and automatic processing of technical documentation. The method ensures interpretability of results due to the explicit representation of knowledge in the form of a graph, resilience to heterogeneous data, and adaptability to various types of user queries. **Discussion:** Prospects for further research are related to the use of unsupervised learning methods to reduce dependence on the quality of labeling, as well as to optimizing the computational efficiency and scalability of graph knowledge models.

**Keywords** – hybrid search, knowledge graph, Retrieval-Augmented Generation, GraphRAG, semantic analysis, spatial data, geographic information systems, coordinates, toponyms, generative AI models.

**For citation:** Menisov A. B., Nagorny D. S., Shelest A. B. A graph-based method for extended knowledge retrieval from specialized texts containing coordinates, geographical names, and abbreviations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 2–15 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-2-15, EDN: WDEXZF

**References**

- Grace K., Sandkühler J. F., Stewart H., Weinstein-Raun B., Thomas S., Stein-Perlman Z., Salvatier J., Brauner J., Korzekwa R. C. Thousands of AI authors on the future of AI. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2025, vol. 84, Article 9. doi:10.1613/jair.1.19087
- Radanliev P. Artificial intelligence: Reflecting on the past and looking towards the next paradigm shift. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2024, vol. 37, no. 7, pp. 1045–1062. doi:10.1080/0952813X.2024.2323042
- Vijayakumaran S., Vimaladevi M., Thangamani R., Vibeesh N., Easwaramoorthy S. V. Revolutionizing legal access: An AI-Driven RAG chatbot for real-time judicial insights. *2025 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA)*, IEEE, 2025, pp. 1–6. doi:10.1109/AIMLA36882.2025.11040439
- Kim J., Hur M., Min M. From RAG to QA-RAG: Integrating generative AI for pharmaceutical regulatory compliance process. *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2025, pp. 1293–1295. doi:10.1145/3672608.3707749
- Peng Z., Kuai X., Ke S., Dong X., Guo R. Enhancing geodatabases operability: Advanced human-computer interaction through RAG and Multi-Agent Systems. *Big Earth Data*, 2025, vol. 9, no. 2, pp. 217–242. doi:10.1080/20964471.2025.2483541
- Barry M., Caillaut G., Halftermeyer P., Qader R., Mouayad M., Le Deit F., Cariolaro D., Gesnoux J. GraphRAG: Leveraging graph-based efficiency to minimize hallucinations in LLM-driven RAG for finance data. *Proceedings of the Workshop on Generative AI and Knowledge Graphs (GenAIK)*, 2025, pp. 54–65.
- Yang R., Xue H., Razzak I., Hacid H., Salim, F. D. KG-IRAG: A knowledge graph-based iterative retrieval-augmented generation framework for temporal reasoning. *arXiv preprint*, 2025. doi:10.48550/arXiv.2503.14234
- Shalagin N. D. A survey on natural language semantic search algorithms. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 9, pp. 11–21 (In Russian).
- Procko T. T., Ochoa O. Graph retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *2024 Conference on AI, Science, Engineering, and Technology (AIxSET)*, Laguna Hills, CA, USA, 2024, pp. 166–169. doi:10.1109/AIxSET62544.2024.00030
- Nikolsky D. R., Barabanov V. F., Grebennikova N. I., Kovalenko S. A., Nuzhny A. M. Analysis of graph database management systems. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 13–20 (In Russian). doi:10.36622/VSTU.2023.19.6.002, EDN: RFOQQE
- Dang D. V., Nguyen H., Le T. T., Do H., Nguyen H., Ngo H. Q., Nguyen H. D. Knowledge graph-based legal query system with LLM and retrieval augmented generation. *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems: Proceedings*. Springer, Singapore, 2025, pp. 161–172. doi:10.1007/978-981-96-5881-7\_13
- Pattabiraman K., Sachin A., Lokeshkumar R. Enhancing business intelligence through NLP and contextual AI synergy. *Engineering Research Express*, 2025, vol. 7, no. 2, Article 025279. doi:10.1088/2631-8695/add9e6
- Wu J., Zhu J., Qi Y., Chen J., Xu M., Menolascina F., Jin Y., Grau V. Medical graph RAG: Evidence-based medical large language model via graph retrieval-augmented generation. *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*, 2025, pp. 28443–28467. doi:10.18653/v1/2025.acl-long.1381
- Yang R., Yang B., Zhao X., Gao F., Feng A., Ouyang S., Blum M., She T., Jiang Y., Lecue F., Lu J., Li I. Graphusion: A RAG framework for scientific knowledge graph construction with a global perspective. *Companion Proceedings of the ACM on Web Conference 2025*, 2025, pp. 2579–2588. doi:10.1145/3701716.3717821
- Arslan M., Ghanem H., Munawar S., Cruz C. A survey on RAG with LLMs. *Procedia Computer Science*, 2024, vol. 246, pp. 3781–3790. doi:10.1016/j.procs.2024.09.178
- Zhou H. Research of text classification based on TF-IDF and CNN-LSTM. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2022, vol. 2171, no. 1, Article 012021. doi:10.1088/1742-6596/2171/1/012021

17. Dai B., Shen X., Wang J. Embedding learning. *Journal of the American Statistical Association*, 2022, vol. 117, no. 537, pp. 307–319. doi:10.1080/01621459.2020.1775614
18. Vicentiy A. V., Dikovitsky V. V., Shishaev M. G. The technology of extraction and visualization of spatial data obtained by texts analysis. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Centra RAN*, 2020, vol. 11, no. 8–11, pp. 115–119 (In Russian). doi:10.37614/2307-5252.2020.8.11.012, EDN: YLXXHN
19. Syed M. A., Arsevska E., Roche M., Teisseire M. GeospatRE: Extraction and geocoding of spatial relation entities in textual documents. *Cartography and Geographic Information Science*, 2023, vol. 52, no. 3, pp. 221–236. doi:10.1080/15230406.2023.2264753
20. Ryazanova V. A. Multiple interpretations of complex words in equivalent word combinations. *MCU Journal of Philology. Theory of Linguistics. Linguistic Education*, 2021, no. 3 (43), pp. 143–148 (In Russian). doi:10.25688/2076-913X.2021.43.3.15
21. Klemmer K., Rolf E., Robinson C., Mackey L., Rußwurm M. Satclip: Global, general-purpose location embeddings with satellite imagery. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2025, vol. 39, no. 4, pp. 4347–4355. doi:10.1609/aaai.v39i4.32457
22. Cao K., Zhou C., Church R., Li X., Li W. Revisiting spatial optimization in the era of geospatial big data and GeoAI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, vol. 129, Article 103832. doi:10.1016/j.jag.2024.103832
23. Zhang J., Fang J., Zhang C., Zhang W., Ren H., Xu L. Geographic named entity matching and evaluation recommendation using multi-objective tasks: A study integrating a large language model (LLM) and retrieval-augmented generation (RAG). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2025, vol. 14, no. 3, p. 95. doi:10.3390/ijgi14030095
24. Coelho J., Magalhães J., Martins B. Improving neural models for the retrieval of relevant passages to geographical queries. *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, 2021, pp. 268–277. doi:10.1145/3474717.3483960
25. Abramovich R. K., Dobrynin V. Y., Platonov A. V. Combining deep language models and sparse vector representations in information retrieval: A review and analysis of modern approaches. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2025, no. 2 (38), pp. 5–17 (In Russian). doi:10.25729/ESI.2025.38.2.001, EDN: HRDWSX
26. Chu Y., Cao H., Diao Y., Lin H. Refined SBERT: Representing sentence BERT in manifold space. *Neurocomputing*, 2023, vol. 555, Article 126453. doi:10.1016/j.neucom.2023.126453
27. Hugging Face. *Sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2*. Available at: <https://huggingface.co/sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2> (accessed 15 November 2025).
28. Kazakova E. D. Analysis of the modern algorithms' accuracy for communities identification on networks when working with graph databases. *Computational Nanotechnology*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 49–59 (In Russian). doi:10.33693/2658-3329-2023-10-1-49-59, EDN: WWHRVH
29. Yang M., Yang M., Wang H., Wei Z., Wang S., Wen J. R. Efficient algorithms for personalized PageRank computation: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2024, vol. 36, no. 9, pp. 4582–4602. doi:10.1109/TKDE.2024.3376000
30. Lu X., Wu J., Yuan J. Optimizing reciprocal rank with bayesian average for improved next item recommendation. *Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2023, pp. 2236–2240. doi:10.1145/3539618.3592033
31. Citarella A. A., Barbella M., Ciobanu M. G., De Marco F., Di Biasi L., Tortora G. Assessing the effectiveness of ROUGE as unbiased metric in Extractive vs. Abstractive summarization techniques. *Journal of Computational Science*, 2025, vol. 87, Article 102571. doi:10.1016/j.jocs.2025.102571
32. Sumithmon K. S., Shajan R. Evaluating similarity measures in collaborative filtering: Insights into accuracy, precision, and computational performance. *Georgian Education Mine*, St. George's College Aruvithura, 2024, vol. 4, no. 1, pp. 99–108.
33. Bellogin A., Castells P., Cantador I. Precision-oriented evaluation of recommender systems: An algorithmic comparison. *Proceedings of the Fifth ACM Conference on Recommender Systems*, 2011, pp. 333–336. doi:10.1145/2043932.2043996
34. Jeunen O., Potapov I., Ustimenko A. On (normalised) discounted cumulative gain as an off-policy evaluation metric for top-n recommendation. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2024, pp. 1222–1233. doi:doi.org/10.1145/3637528.36716



## Интервальная ART-нейронная сеть для решения задач кластеризации при анализе образов с интервальными атрибутами

А. Ю. Кучмин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-0699-6112](https://orcid.org/0000-0003-0699-6112), [radiotelescope@yandex.ru](mailto:radiotelescope@yandex.ru)

С. С. Расова<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-1272-1839](https://orcid.org/0000-0002-1272-1839)

И. Л. Тарасова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-2282-150X](https://orcid.org/0000-0002-2282-150X)

<sup>а</sup>Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 191718, РФ

**Введение:** в системах машинного зрения при обработке результатов экспериментов и моделировании интеллектуальных систем широко используются методы на основе адаптивного резонанса. Такие системы могут работать в условиях неопределенности, для описания которой используются интервальные данные. Но известные методы теории адаптивного резонанса не оперируют таким типом данных. **Цель:** разработать динамическую нейронную сеть на основе теории адаптивного резонанса для анализа образов с интервальными атрибутами и создать методы ее обучения. **Результаты:** предложена структура интервальной нейронной сети с использованием теории адаптивного резонанса, которая позволяет решать задачу кластеризации данных при анализе многомерных образов с интервальными атрибутами в условиях действия различного рода помех и искажений. На ее основе разработана компьютерная программа для моделирования данной нейронной сети при решении указанной задачи. Проведено численное моделирование представленной интервальной нейронной сети, показавшее высокую эффективность при анализе зашумленных образов. Сеть обладает свойством самообучения. Анализ предложенных моделей мер близости (бинарной, меры близости 1, меры близости 2) входных образов нейронной сети и хранящихся в памяти продемонстрировал их схожую эффективность, но лучшей точностью обладает мера близости 2, которая и рекомендуется в качестве основной. **Практическая значимость:** описанная интервальная нейронная сеть расширяет возможности машинного зрения, мобильных роботов, может использоваться для создания систем анализа конфигурации пространства, в котором данный робот функционирует. Сеть может применяться также для выявления скрытых закономерностей при анализе экспериментальных данных, при создании информационно-советующих систем, работающих в условиях интервальной неопределенности.

**Ключевые слова** — искусственные нейронные сети, теория адаптивного резонанса, интервальные вычисления, интервальные нейронные сети, распознавание образов.

**Для цитирования:** Кучмин А. Ю., Расова С. С., Тарасова И. Л. Интервальная ART-нейронная сеть для решения задач кластеризации при анализе образов с интервальными атрибутами. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 16–26. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-16-26, EDN: NUDWKF

**For citation:** Kuchmin A. Yu., Rasova S. S., Tarasova I. L. Interval ART neural network for clustering images with interval attributes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 16–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-16-26, EDN: NUDWKF

### Введение

Современные информационно-управляющие системы работают в условиях наличия всевозможных неопределенностей и ограничений [1–4]. Поэтому разрабатывать математические модели подобных систем и алгоритмы управления необходимо с учетом данных неопределенностей. Наиболее простой подход в описании подобного рода систем — это использование интервальных методов и моделей. В настоящее время интервальные методы интенсивно развиваются [5–9], что позволяет обращаться к ним при решении задач распознавания образов и управления сложными физико-техническими системами. Большое внимание в современной теории управления уделяется применению интеллектуаль-

ных средств [10–12], в частности, существуют такие парадигмы, как нечеткие системы, нейронные сети, эмерджентные системы, эволюционные методы и т. д., каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Перспективным при распознавании образов и управлении является использование нейронных сетей не только прямого распространения, но и рекуррентных с памятью, например нейронных сетей на основе теории адаптивного резонанса (ART-нейронных сетей) [13–21]. Все больше в интеллектуальных системах объединяются различные парадигмы искусственного интеллекта в целях сочетания сильных свойств методов и возможностей устранения недостатков. Это направление под названием «гибридные интеллектуальные системы» в настоящий момент эффективно развивается.

Нейронные сети обладают высокой обобщающей способностью, поэтому выбор данной парадигмы и объединение с методами интервального анализа позволяют еще больше расширить это свойство. Создание новых видов интервальных нейронных сетей — важная и актуальная задача. ART-нейронные сети имеют преимущество над сетями прямого распространения, поэтому является перспективным их развитие и объединение с интервальными методами, что до недавнего времени не разрабатывалось. В частности, ART-нейронные сети с применением гибридного подхода объединялись с нечеткой логикой, эволюционными методами, но не использовались для анализа интервальных данных.

### Основные сведения об ART-нейронных сетях

Теория адаптивного резонанса предложена Гроссбергом и Карпендером в 1987 г. для решения задач кластеризации данных, что привело к разработке ART-алгоритмов сначала для бинарных данных, а впоследствии — непрерывных и нечетких данных. Затем на базе разработанных алгоритмов были созданы ART-нейронные сети. Гроссберг и Карпендер пытались решить задачу стабильности и пластичности при распознавании образов, которая заключается в необходимости усваивать новые знания при сохранении уже проверенной информации, что моделирует процесс восприятия и обучения человеком. Требуется соблюсти баланс между фрагментированием нового поступающего знания и обобщением данного знания, что нашло реализацию в виде нового класса динамических нейронных сетей — ART-нейронных сетей. В основе технологии лежит идея генерации отклика нейронной сети и сравнение данного отклика с входным образом при выполнении специального теста под названием «тест бдительности». Коэффициент бдительности — это некоторый пороговый коэффициент, определяющий близость поступающей новой информации к уже хранящейся в нейронной сети. Если входной образ близок к отклику, который хранится в памяти нейронной сети, то входной образ добавляется в память оператором обобщения. Таким образом формируются кластеры, которые используются при решении задачи распознавания образов. Классическая ART-сеть состоит из двух слоев, каждый из которых представляет собой самоорганизующуюся карту Кохонена. Они соединяются между собой входными звездами и выходными звездами, которые являются элементами нейронной сети. Также используется специальный блок для вычисления коэффициента бдительности, который управля-

ет активностью нейронов второй самоорганизующейся карты Кохонена. Используемые виды ART-нейронных сетей работают с бинарными, непрерывными и нечеткими данными. В задачах распознавания образов и интеллектуальном управлении приходится оперировать различного рода неопределенностями, одними из самых простых моделей которых являются интервальные. Поэтому насущно создание гибридной нейронной сети на основании ART-технологии и интервальных вычислений. Цель данной работы — разработка ART-нейронной сети, оперирующей интервальными данными.

### Основные сведения об интервальных вычислениях

Теория интервальных вычислений — это интенсивно развивающееся направление, основная идея которого заключается в использовании интервальных данных при решении различного рода задач математического анализа, теории управления, искусственного интеллекта и пр. Данный подход разрабатывается уже долгое время (работы Э. Р. Хансена, Ю. И. Шокина, В. И. Левина, С. П. Шарого и др.). В 2015 г. был принят международный стандарт интервальных вычислений IEEE 1788-2015. Следует отдельно отметить вклад В. И. Левина в разработку методов исследования систем, работающих в условиях неопределенности. Основным математическим объектом интервальных вычислений является интервал и связанные с ним величины, такие как интервальные функции и производные от них математические объекты. Можно разделить операции над интервалами как над множествами (объединение, пересечение и т. д.) и интервальную арифметику, когда используются обычные математические операции, но над интервальными данными (сложение, вычитание, умножение, деление и др.). Обобщая работы упомянутых ученых, можно сделать вывод, что интервальные методы являются простым механизмом учета различного рода неопределенностей при описании поведения систем. В реальных системах мы получаем параметры, которые с определенной долей достоверности находятся в некоторых интервалах, поэтому выбор интервальных методов определяется самим типом данных, получаемых с измерительных систем. С другой стороны, существующие методы интервального анализа не совсем применимы для решения задач интеллектуального управления и распознавания образов в динамических системах, так как на каждом этапе вычислений возможно увеличение диапазонов интервальных оценок, что часто приводит к вырождению задач.

Также необходима разработка методов обучения с использованием интервальных данных в системах с искусственным интеллектом. Поэтому объединение технологии ART-нейронных сетей и интервальных вычислений позволит получить методы обучения с использованием интервальных данных.

### Структура интервальной ART-нейронной сети

Принципы работы ART-нейронной сети обеспечивают выполнение трех основных операций: сравнения входящего образа с образом, хранящимся в нейронной сети; вычисления меры близости этих двух образов и вычисления порога бдительности; обобщения входящего образа на основании информации, хранящейся в нейронной сети. Для каждой операции необходимо определить математическую модель. Так как мы оперируем интервальными данными, математические операции тоже должны носить интервальный характер. Операция сравнения должна характеризоваться концентрацией информации, и для этого лучше всего подходит операция пересечения интервалов. Поскольку приходится одновременно оперировать несколькими входными величинами в нейронной сети, мы получаем вектор параметров, элементы которого являются интервалом. Такой математический объект носит название бруска. Мы решаем задачу пересечения данных брусков. Результат пересечения двух интервалов тоже является интервалом. По итогу операции пересечения мы сокращаем неопределенность.

Для операции вычисления меры близости входного образа и хранящегося в нейронной сети могут быть выбраны следующие модели.

1. Бинарная. Если интервалы имеют хотя бы один общий элемент, тогда функция близости двух интервалов равна единице, в противном случае нулю. Для каждого элемента бруска функции близости суммируются, и вычисляется их среднее значение, которое берется в качестве меры близости двух образов.

2. Мера близости 1. Для двух интервалов вводится следующая мера близости. На первом этапе вычисляется пересечение входного интервала и хранящегося в нейронной сети. Затем определяется длина полученного интервала. Функция близости двух интервалов находится как отношение вычисленной длины интервала, полученного после операции пересечения, к длине эталонного интервала, который хранится в нейронной сети. В случае, если длина эталонного интервала равна нулю (интервал вырождается в число), а результат пересечения интервалов

не является пустым множеством, функция близости равна единице. Если результат пересечения интервалов является пустым множеством, а эталонный интервал представляет собой число, функция близости равна нулю. Следует отметить, что эталонный интервал не может быть пустым множеством. Таким образом, вычисляется функция близости для каждого элемента бруска, а далее находится их среднее значение.

3. Мера близости 2. Вычисляется по аналогии с мерой близости 1. Находится интервал пересечения двух соответствующих интервалов: одного из входящего образа и второго эталонного, хранящегося в нейронной сети. Определяется его длина. Функция близости двух интервалов вычисляется как отношение длины интервала пересечения входного и эталонного интервалов к максимальному значению из длин входного и эталонного интервалов. В случае, если входной и эталонный интервалы являются вырожденными и равными друг другу, функция близости равна единице. В случае, если оба интервала являются вырожденными и неравными друг другу, функция близости равна нулю. Входной и эталонный интервалы не могут быть пустыми множествами. Далее функция близости вычисляется для соответствующих элементов входного и эталонного брусков, а мера близости вычисляется как среднее значение функции близости.

Следующей мы рассмотрим операцию обобщения информации нейронной сетью. В классическом ART-алгоритме используется операция объединения входного и эталонного образов, если превышен порог бдительности. Операция объединения для интервальных данных в общем случае приводит к появлению математических объектов, которые не являются интервалами, а интервал будет только в случае, если оба интервала имеют хотя бы одно общее значение. Нам требуется получать результат в виде интервала для всех возможных случаев данных, с которыми оперирует нейронная сеть. Поэтому мы будем использовать арифметическую операцию вычисления среднего для нескольких интервалов:

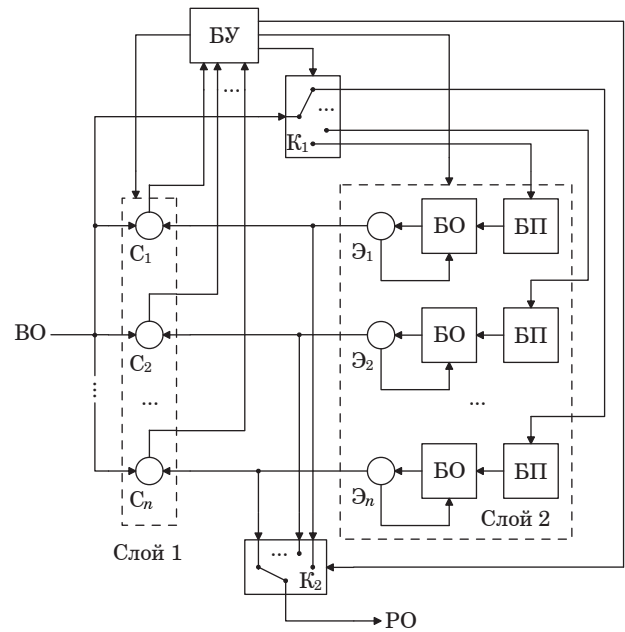
$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_i a_i,$$

где  $\bar{a}$  — осредненный интервал;  $N$  — число интервалов;  $i$  — индекс интервала;  $a_i$  —  $i$ -й интервал.

Результатом вычисления среднего для интервалов будет тоже интервал, что соответствует нашим критериям. Наша нейронная сеть является динамической и обладает памятью на  $N$ -е число образов одного кластера. Поэтому будет выполняться осреднение по всем этим образам.

Предлагаемая интервальная ART-нейронная сеть состоит из двух слоев, соединенных между собой соответствующими связями. В первом слое решается задача вычисления интервалов пересечения между входным образом и эталонными образами, хранящимися в памяти нейронной сети, которые являются центрами кластеров. В структуру нейронной сети входит также блок вычисления меры близости входного образа и эталонных образов. Соответственно, в качестве меры близости может быть выбрана одна из рассмотренных выше. После вычисления мер близости для всех эталонных образов вычисляется максимальное значение и соответствующий ему эталонный образ. В случае если существует несколько эталонных образов с одинаковой мерой близости, то выбирается первый по очередности. Уровень бдительности рассчитывается исходя из меры близости входного образа и эталонных образов нейронной сети. В простейшем случае уровень бдительности рассчитывается как максимум значений мер близости входного образа и эталонных образов нейронной сети. Если уровень бдительности ниже заданного порогового значения (порог 1, параметр пластичности), то создается новый эталонный образ, который является входным образом. Если уровень бдительности больше некоторого порогового значения (порог 2, параметр жесткости), то считается, что сеть распознала образ, и этот образ является эталонным образом с соответствующим номером. Входной образ помещается в память второго слоя в раздел, соответствующий эталону-победителю. Объем памяти в данном разделе ограничен, и при его превышении происходит осреднение эталонного образа и образов, хранящихся в памяти соответствующего раздела. Таким образом модифицируется эталонный образ. Если уровень бдительности не превышает порога 2, то определяется эталонный образ по максимуму меры близости между входным образом и эталонными. Выбирается тот эталонный образ, для которого мера близости максимальна. Запись входного образа в память второго слоя не производится.

Интервальную ART-нейронную сеть (рисунок) составляют следующие блоки: слой 1, слой 2 и вспомогательные блоки. Слой 1 включает в себя блоки сравнения  $C_1, \dots, C_n$ , на которых осуществляется сравнение входного образа  $VO$  и эталонов, хранящихся в памяти нейронной сети. Каждый блок сравнения вычисляет меру близости эталона и входного образа. Слой 2 состоит из  $n$  каналов, каждый из которых связан с соответствующим эталоном. Каждый канал состоит из блока эталона  $\Theta_i$ , блока осреднения  $BO$  и блока памяти  $BP$ . Блок памяти хранит информацию обо всех распознанных образах, мера близости которых превышает порог 2. Блок памяти име-



■ Структура интервальной ART-нейронной сети для решения задач кластеризации  
 ■ Structure of an interval ART neural network for solving clustering tasks

ет ограниченную емкость. При переполнении памяти происходит осреднение образов, хранящихся в блоке памяти, и эталона, хранящегося в блоке эталона. После этого память освобождается, а в блок эталона записывается новое значение эталона. Управление схемой совершается с помощью блока управления  $БУ$  и коммутаторов  $K_1$  и  $K_2$ . Блок управления вычисляет номер эталона-победителя и коммутирует соответствующий канал передачи данных. Блок управления осуществляет управление записью в блоке памяти через коммутатор  $K_1$ , а также выдачу данных эталона-победителя через коммутатор  $K_2$  на выход с названием «распознанный образ»  $PO$ . В случае, если мера близости эталона-победителя ниже порога 1, блок управления расширяет слой 1 и 2, добавляя новые каналы.

Предлагаемая структура интервальной ART-нейронной сети, как мы видим, обладает свойством самообучения, что выражается в добавлении новых эталонных образов и их модификации за счет операции обобщения. Следует отметить, что, варьируя значениями порогов 1 и 2, можно управлять процессом стабильности и пластичности при решении задач распознавания образов нейронной сетью. Так, если порог 1 имеет малое значение, то новые эталонные образы будут добавляться реже. Если порог 2 очень высокий, то добавление новых образов в память второго слоя тоже будет реже, что в свою очередь существенно скажется на свойстве обобщения нейронной сети.

### Алгоритм моделирования интервальной ART-нейронной сети

В данном разделе описывается алгоритм программы, моделирующей работу интервальной ART-нейронной сети. В качестве входных образов используются бруски с интервальными атрибутами, характеризующие классифицируемые объекты.

1. Начало.

2. Вводятся параметры нейронной сети: порог 1 (параметр пластичности), порог 2 (параметр жесткости), максимальная длина интервала атрибута, размер памяти нейронной сети, база эталонных образов  $\mathbf{e}_i = [e_{i,1}, \dots, e_{i,m}]$ , полученных на стадии обучения нейронной сети (если обучение проводилось), где  $e_{i,1}, \dots, e_{i,m}$  — атрибуты эталона, заданные в виде интервалов.

3. Выбирается тип меры близости: 0 — бинарная, 1 — мера близости 1, 2 — мера близости 2.

4. Вводится входной образ с интервальными атрибутами  $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_m]$ , где  $v_1, \dots, v_m$  — атрибуты входного образа, заданные в виде интервалов. Атрибуты должны быть нормализованными и находиться в диапазоне от нуля до единицы.

5. Записывается входной образ в первый слой нейронной сети.

6. В первом слое сравниваются входной образ и эталонные образы, хранящиеся в памяти второго слоя нейронной сети. Если эталонные образы отсутствуют, то сохраненный в первом слое образ копируется в память второго слоя и становится эталонным.

7. В результате сравнения входного образа с эталонными для каждого эталонного образа рассчитывается величина меры близости. Для каждого атрибута образа вычисляется функция близости исходя из типа выбранной меры близости. Для бинарной меры близости функция вычисляется по формуле  $f_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } |e_{i,j} \cap v_j| > 0 \\ 0, & \text{если } |e_{i,j} \cap v_j| = 0 \end{cases}$ .

В случае меры близости 1 используется выражение  $f_{i,j} = \frac{|e_{i,j} \cap v_j|}{|e_{i,j}|}$ , а для меры близости 2 расчет ведется по формуле  $f_{i,j} = \frac{|e_{i,j} \cap v_j|}{\max(|e_{i,j}|, |v_j|)}$ .

Потом для всего выбранного эталонного образа находится среднее значение функции близости, которое является значением меры близости для данного эталонного образа.

8. Находится максимальное значение меры близости и выбирается соответствующий ему эталонный образ. Рассчитывается уровень бдительности как максимум мер близости эталонов.

9. Если уровень бдительности меньше параметра пластичности, то входной образ записывается в память второго слоя как новый эталонный образ.

10. Если уровень бдительности выше порога жесткости, то выходом нейронной сети является соответствующий эталонный образ. Входной образ копируется в память второго слоя соответствующего эталонного образа. Если количество образов  $\mathbf{b}_{i,k}$  в памяти раздела второго слоя сети, соответствующего эталонному образу, равно максимальному значению, происходит осреднение эталонного образа и образов в памяти по

формуле  $\mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{e}_i^*}{N+1} + \frac{1}{N+1} \sum_k \mathbf{b}_{i,k}$ , где  $\mathbf{e}_i^*$  — ис-

ходный  $i$ -й эталонный образ. Полученное среднее значение записывается в качестве эталонного образа, при этом осуществляется контроль величины длины интервальных атрибутов исходя из заданного максимального значения. Если длина интервалов атрибутов больше, их величина уменьшается до максимального размера.

11. В случае если уровень бдительности ниже параметра жесткости, но выше параметра пластичности, то на выход нейронной сети подается соответствующий эталонный образ. Запись в память не осуществляется.

12. Производится запись в файл параметров нейронной сети и состояния памяти нейронной сети и базы эталонных образов.

13. Конец.

Предлагаемый алгоритм работы нейронной сети формирует эталонные образы в ходе функционирования нейронной сети. Для повышения помехоустойчивости эталонные образы в памяти сети могут быть получены в ходе обучения по тестовым выборкам, когда может быть проверена правильность формирования эталонных образов. Алгоритм функционирования нейронной сети при обучении аналогичен описанному выше и отличается тем, что результат обучения записывается в некоторую структуру, где сохраняются такие параметры нейронной сети, как тип меры близости, параметр жесткости, параметр пластичности, максимальная длина интервала атрибута, база эталонных образов, база памяти второго слоя нейронной сети, которые могут быть загружены в нейронную сеть для ее моделирования, что повышает эффективность распознавания образов.

Проанализируем и охарактеризуем рассмотренный алгоритм.

Новый алгоритм обладает сходимостью и при конечном числе входных образов формирует конечное число эталонов: один или больше. Алгоритм устойчив к проблеме размывания границ эталонов, так как длина интервалов атрибу-

тов эталонов ограничена сверху. Алгоритм имеет свойство адаптивности и через пороговые значения порога 1, порога 2 регулирует детализацию кластеризации.

Алгоритм обладает фундаментальной новизной на уровне архитектуры и представляет собой дальнейшее развитие нейронных сетей на основе теории адаптивного резонанса для случая интервальных данных. Предлагаемый алгоритм в отличие от классического подхода ART работает с интервальной неопределенностью на уровне архитектуры в трех режимах: создание, уточнение, идентификация. В отличие от классического ART распознаются блоки памяти для сохранения распознанных образов и в дальнейшем применяется контролируемое осреднение, что позволяет повысить эффективность соблюдения баланса между пластичностью и стабильностью при распознавании. Математическая новизна представлена на уровне модели и заключается в предложении новых мер близости на основе адаптации мер Жаккара. Алгоритмическая новизна заключается в трехуровневом механизме принятия решений, что обеспечивает разделение функций обнаружения новых образов и уточнение известных эталонов. Практическая новизна состоит в возможности решать задачи с неопределенностью, кластеризации образов с интервальными атрибутами, что может повысить эффективность систем медицинской диагностики, систем онлайн-обучения и принятия решений с неопределенностью, адаптивных систем управления.

### Результаты компьютерного моделирования интервальной ART-нейронной сети

Для реализации интервальной ART-нейронной сети был разработан пакет компьютерных программ [22], позволяющий проводить подготовку тестовых данных с различными уровнями погрешности, обучение нейронной сети на тестовых и реальных данных, а также выполнять ее моделирование. Структура данных для обучения и моделирования представляет собой последовательность образов анализируемых объектов, каждый из которых задается в виде матрицы размерности  $m \times 2$ , где  $m$  — количество атрибутов анализируемого образа. Каждая строка образа кодирует атрибут в виде интервального значения. Первый элемент строки — нижняя граница интервала, второй элемент строки — верхняя граница интервала. Все образы имеют одинаковое количество атрибутов. Интервалы атрибутов нормализуются и масштабируются в диапазоне от 0 до 1 таким образом, что интервал атрибута является подынтервалом интервала [0, 1].

Нейронная сеть обрабатывает каждый образ последовательности в отдельности. Выходом сети является образ-победитель, который также задается в виде матрицы  $m \times 2$ , структура которой аналогична входному образу. Кроме того, в сеть при ее моделировании и обучении загружаются дополнительные величины:

- имя файла с обучающими данными;
- имя файла с реальными данными;
- параметр жесткости;
- параметр пластичности;
- максимальная длина интервала атрибута;
- размер памяти нейронной сети;
- тип меры близости.

В качестве выходных данных в файл записывается база данных полученных эталонных образов, которые сформированы при решении задачи кластеризации. Каждый эталонный образ является центром соответствующего кластера, в который группируются данные.

Обучение и тестирование нейронной сети осуществлялось на выборках, сгенерированных с помощью соответствующей программы, позволяющей формировать последовательность тестовых образов, которые зашумляются с соответствующим уровнем погрешности, меняющимся в диапазоне от 0 до 100 % от минимального расстояния между задаваемыми эталонными тестовыми образами и максимальной длины атрибута тестового эталонного образа. Для более удобного анализа работы нейронной сети количество тестовых эталонных образов было ограничено четырьмя. Каждый тестовый эталонный образ имел пять атрибутов.

Поскольку нейронная сеть решает задачу кластеризации данных, возникает проблема сравнения выходного образа и тестового эталонного образа, который был зашумлен и подавался на вход. Поэтому точность распознавания образа определялась с помощью вычисления меры близости зашумленного тестового эталонного образа и отклика сети с использованием меры близости 2.

Обучение нейронной сети проводилось на выборке, сформированной из зашумленных эталонных тестовых образов с амплитудой помехи 10 %, при этом зашумлялась и ширина интервалов атрибутов, и изменение центров этих интервалов (таким образом, изменялась и ширина интервалов атрибутов, и их смещение). Длина обучающей выборки составила 4000 образов. Анализ базы эталонов нейронной сети показал, что при небольших амплитудах шума все три методики вычисления меры близости (бинарная, мера близости 1, мера близости 2) демонстрировали высокую эффективность. Средняя мера близости эталонных образов нейронной сети и тестовых эталонных образов, закодированных в обучающей последовательности, составила 0,98.

База эталонных образов нейронной сети была загружена в программу моделирования сети. Далее выполнялись эксперименты с тестовыми выборками, которые зашумлялись в диапазоне изменения амплитуды помехи от 0 до 100 %, и проводились тесты различных моделей мер близости. Результаты приведены в табл. 1 (эффективность распознавания образов с использованием мер близости 1 и 2 совпадают).

Моделирование проходило при следующих параметрах нейронной сети:

- параметр жесткости – 0,6;
- параметр пластичности – 0,1;
- максимальная длина интервала атрибута – 0,1;
- размер памяти нейронной сети – 5.

Меры близости (табл. 1) вычислялись следующим образом. Для каждой амплитуды шума генерировалась тестовая последовательность длиной 4000 образов с использованием четырех тестовых эталонных образов, которые зашумлялись. Данная выборка подавалась на вход нейронной сети, и рассчитывались выходные образы – результат распознавания нейронной сети. С помощью модели меры близости 2 выходной образ сравнивался с соответствующим тестовым эталонным образом, который был зашумлен. В дальнейшем для всей выборки рассчитывалась средняя мера близости, которая отображена в таблице.

Анализируя данные в табл. 1, следует отметить, что хуже всех проявила себя бинарная мера близости, а мера близости 1 и мера близости 2 показали схожие результаты. Однако следует учитывать, что при обучении нейронной сети при мере близости 1 были сформированы эталонные образы нейронной сети, которые меньше отличались от тестовых базовых образов по сравнению с мерой близости 2. Можно сказать, что эффективности этих мер схожи.

Следующий эксперимент посвящен анализу стабильности формирования эталонных образов нейронной сети в зависимости от вида меры близости и амплитуды шума во входящей выборке. Обучающая выборка будет формироваться аналогично предыдущим экспериментам, а анализ близости эталонных образов нейронной сети тестовым эталонным образам будет осуществляться также с помощью меры близости 2.

Результаты моделирования, приведенные в табл. 2, показывают, что разработанная интервальная ART-нейронная сеть обладает хорошей эффективностью при решении задач распознавания образов с интервальными атрибутами. Данная нейронная сеть решает задачу кластеризации и позволяет находить скрытые взаимосвязи в последовательности анализируемых образов, что является важным свойством сети,

■ **Таблица 1.** Эффективность распознавания образов от вида методики расчета меры близости при моделировании

■ **Table 1.** Pattern recognition efficiency versus the type of proximity measure calculation method in modeling

Амплитуда помехи, %	Бинарная мера близости	Меры близости 1 и 2
<b>Шум смещает центры интервалов атрибутов образов при неизменной их длине</b>		
0	0,9924	0,9924
10	0,6810	0,9042
20	0,6347	0,8135
30	0,5952	0,7225
40	0,5474	0,7807
50	0,4872	0,6080
60	0,4248	0,4385
70	0,3579	0,4491
80	0,2904	0,3735
90	0,2155	0,0957
100	0,0127	0,0011
<b>Шум изменяет длины интервалов атрибутов образов при неизменных положениях их центров</b>		
0	0,9924	0,9924
10	0,9057	0,9057
20	0,8167	0,8167
30	0,7271	0,7271
40	0,6372	0,8680
50	0,5468	0,9277
60	0,4562	0,9277
70	0,3655	0,9277
80	0,2747	0,9277
90	0,1839	0,7336
100	0,0930	0

которое связано с ее самообучением. Были проанализированы различные типы мер близости и их влияние на качество работы нейронной сети. Показано, что наилучшей эффективностью обладает модель меры близости 2. Модель меры близости 1 не сильно уступает по эффективности мере близости 2, но формирует менее стабильные кластеры по сравнению с мерой близости 2. Мера близости 2 более точно позволяет оценить схожесть двух образов с интервальными атрибутами. Именно поэтому она была выбрана как эталон для расчета эффективности работы нейронной сети.

Как уже сказано, данный алгоритм является дальнейшим развитием теории нейронных сетей на основе ART для адаптации их к работе с неопределенностью. Известны два алгоритма: нечеткая ART и байесова ART. Нечеткая ART оперирует нечеткими множествами, байесова ART оперирует вероятностными характеристиками. Предлагаемый алгоритм оперирует интервальными данными. Все три вида могут быть использованы для описания интервальной

■ **Таблица 2.** Точность формирования эталонных образов нейронной сети от вида методики расчета меры близости при моделировании

■ **Table 2.** Accuracy of neural network prototype formation versus the type of proximity measure calculation method in modeling

Амплитуда помехи, %	Бинарная мера близости	Мера близости 1	Мера близости 2
<b>Шум смещает центры интервалов атрибутов образов при неизменной их длине</b>			
0	1	1	1
10	0,9836	0,9842	0,9842
20	0,9439	0,9685	0,9685
30	0,9451	0,9519	0,9519
40	0,9335	0,9274	0,9274
50	0,6824	0,9080	0,9079
60	0,8861	0,8842	0,8831
70	0,6139	0,8595	0,8558
80	0,8692	0,8085	0,8617
90	0,8181	0,7462	0,7617
100	0,8362	0,7070	0,7527
<b>Шум изменяет длины интервалов атрибутов образов при неизменных положениях их центров</b>			
0	1	1	1
10	0,9900	0,9845	0,9845
20	0,9739	0,9800	0,9800
30	0,9610	0,9684	0,9684
40	0,9418	0,9469	0,9469
50	0,9327	0,9424	0,9325
60	0,9418	0,9441	0,9463
70	0,9211	0,9265	0,9342
80	0,8922	0,9257	0,9335
90	0,9080	0,9078	0,9194
100	0,8600	0,9260	0,9172

неопределенности, но первые два делают это опосредованно, а в предлагаемом алгоритме используются методы интервального анализа, что повышает его эффективность в случае интервальных данных.

Выполнялось сравнение интервальной ART-нейронной сети, которая является динамической и рекуррентной, с интервальными сетями прямого распространения (интервальным перцептроном). Интервальный перцептрон решает задачу классификации, однако классы формируются на стадии обучения, и можно рассматривать этот процесс как задачу кластеризации. Возникает проблема выбора топологии интервального перцептрона. Необходимо применять сложные методы его обучения, стабильность которых зависит от качества обучающей выборки: чем эта выборка больше, тем эффективность обучения будет выше. В сравнении с ним интервальная ART-нейронная сеть имеет более компактную топологию (меньшее число настраиваемых па-

раметров), обладает большей помехоустойчивостью, свойством самообучения и проявляет высокую эффективность при небольших размерах обучающих выборок. При тех же обучающих выборках многослойный перцептрон показал более низкую эффективность, которую можно преодолеть, увеличивая число обучающей выборки и, как следствие, сложность его топологии.

### Заключение

В статье предложена новая динамическая нейронная сеть на основе теории адаптивного резонанса для анализа многомерных образов с интервальными атрибутами. Данная сеть является гибридной и объединяет в себе две технологии: искусственные нейронные сети и методы интервального анализа данных. Настоящая работа закрывает пробел в теории ART-нейронных сетей, в частности, существовали сети для анализа бинарных, непрерывных, нечетких, но не было нейронной сети для работы с интервальными данными. Соответственно, предложена двухслойная интервальная динамическая нейронная сеть на основе ART, которая использует методы интервальных вычислений. Как и другие виды нейронных сетей данного семейства, предлагаемая сеть предназначена для решения задач кластеризации многомерных данных и поиска скрытых закономерностей. Было выполнено численное моделирование данной нейронной сети и показана ее эффективность на тестовых примерах решения задачи распознавания многомерных образов с интервальными атрибутами при наличии шума и различного рода искажений. Показано, что сеть обладает высокой эффективностью и формирует стабильные кластеры с использованием методов самообучения. Отличительной особенностью предлагаемой нейронной сети является вычисление в первом слое меры близости входного образа и образов, хранящихся в памяти нейронной сети. Рассмотрены три основные модели вычисления меры близости: бинарная, мера близости 1 и мера близости 2. Все три меры показали высокую эффективность, однако мера близости 2 в ряде экспериментов показала большую эффективность и идеологически лучше других описывает близость двух интервальных образов. Поэтому она рекомендуется для использования в качестве основной. Дальнейшие исследования данной нейронной сети будут направлены на ее применение в различных областях интеллектуальных электромеханических систем для создания систем машинного зрения, систем принятия решений и анализа экспериментальных данных.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена в рамках государственного контракта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 124041500008-1

## Литература

1. Yang C., Wang Q., Lu W., Li Y. Integrated uncertain optimal design strategy for truss configuration and attitude–vibration control in rigid–flexible coupling structure with interval uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 2025, vol. 113, no. 3, pp. 2215–2238. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10291-w>
2. Калашников П. В. Применение сценарного подхода к анализу и управлению рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях интервальной неопределенности. *Транспорт и информационные технологии*, 2023, т. 13, № 3, с. 224–236. doi:10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236. <https://ijournal-as.com/jour/index.php/ijas/article/view/237> (дата обращения: 29.01.2025).
3. Lai Y., Shi Y., Han Y., Shao Y., Qi M., Li B. Exploring uncertainty in regression neural networks for construction of prediction intervals. *Neurocomputing*, 2022, vol. 481, pp. 249–257. doi:10.1016/j.neucom.2022.01.084
4. Носков С. И., Кириллова Т. К., Ведерников В. С. Взвешивание наблюдений выборки при построении линейной регрессии по данным с интервальной неопределенностью для независимых переменных. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2024, № 4 (224), с. 51–56. doi:10.17213/1560-3644-2024-4-51-56
5. Шарый С. П. *Конечномерный интервальный анализ*. Новосибирск, XYZ, 2022. 654 с.
6. Баженов А. Н., Жилин С. И., Кумков С. И., Шарый С. П. *Обработка и анализ интервальных данных*. М., Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2024. 356 с.
7. Выгодчикова И. Ю., Горский М. А., Максимов Д. А., Халиков М. А. *Теоретические подходы и инструментарий моделирования динамических рядов интервальных данных*. М., Академия Естествознания, 2025. 184 с.
8. Червяков А. А., Никульчев Е. В. Робастное интервальное прогнозирование временных рядов. *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 122–128. <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1540> (дата обращения: 18.09.2025).
9. Болотнов А. М., Купцова А. Ф. Нестандартные интервальные операции при решении прикладных задач. *Современные наукоемкие технологии*, 2023, № 2, с. 17–22. doi:10.17513/snt.39518
10. Rossi F., Bernardeschi C., Cococcioni M. Neural networks in closed-loop systems: Verification using interval arithmetic and formal prover. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109238>
11. Canillas S. F., da Silva R. J., Minussi C. R. *Behavioral Diagnosis on Individual Electricity Consumption: Formulation Using a Neural Network Based on Adaptive Resonance Theory*. 2025, 20 p. doi:10.20944/preprints202507.2247.v1. <https://www.preprints.org/manuscript/202507.2247/v1> (дата обращения: 10.09.2025).
12. Федутин К. А., Каширина И. Л. Разработка средств интеллектуальной поддержки принятия решений на основе данных мониторинга. *Вестник Воронежского института высоких технологий*, 2023, № 3 (46). <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/article?id=192&ysclid=mfpb0cflzk954566701> (дата обращения: 19.08.2025).
13. Buhanov D., Chernikov S., Polyakov V., Panchenko M. Detection of video image modification using a classifier based on adaptive resonance theory. *International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems*, Springer, 2022, pp. 23–32. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_3)
14. Bargsten V., Kirchner F. Actuator-level motion and contact episode learning and classification using adaptive resonance theory. *Intelligent Service Robotics*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 537–548. <https://doi.org/10.1007/s11370-023-00481-7>
15. Da Silva L. E. B., Rayapati N., Wunsch D. C. iCVI-ARTMAP: Using incremental cluster validity indices and adaptive resonance theory reset mechanism to accelerate validation and achieve multiprototype unsupervised representations. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, vol. 34, no. 12, pp. 9757–9770. doi:10.1109/TNNLS.2022.3160381
16. Pourpanah F., Lim C. P., Etemad A., Wu Q. J. An ensemble semi-supervised adaptive resonance theory model with explanation capability for pattern classification. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 814–827. doi:10.1109/TETCI.2023.3285932
17. Czmil S., Kluska J., Czmil A. An empirical study of a simple incremental classifier based on vector quantization and adaptive resonance theory. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2024, vol. 34, no. 1, pp. 149–165. doi:10.61822/amcs-2024-0011
18. Wu W., Hu Y., Xu K., Qin L., Yin Q. Self-organizing memory based on adaptive resonance theory for vision

and language navigation. *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 19. <https://doi.org/10.3390/math11194192>. <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/19/4192> (дата обращения: 27.08.2025).

19. Zangana H., Mustafa F. M., Omar M. Advances in adaptive resonance theory for object identification and recognition in image processing. *Jurnal Ilmiah Computer Science*, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 86–100. <https://doi.org/10.58602/jics.v3i2.41>

20. Zangana H., Mohammed A. K., Omar M., Mustafa F. M., Vitianingsih A. V. Adaptive resonance theory-based approach for robust and efficient face recognition. *Vokasi Unesa Bulletin of Engineering, Technology and Applied Science*, 2025, vol. 2, no. 3, pp. 602–618. <https://doi.org/10.26740/vubeta.v2i3.38709>. <https://journal.unesa.ac.id/index.php/vubeta/article/view/38709> (дата обращения: 15.03.2025).

38709. <https://journal.unesa.ac.id/index.php/vubeta/article/view/38709> (дата обращения: 15.03.2025).

21. Masuyama N., Nojima Y., Toda Y., Loo C. K., Ishibuchi H., Kubota N. Privacy-preserving continual federated clustering via adaptive resonance theory. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 139692–139710. doi:10.1109/ACCESS.2024.3467114. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10689590> (дата обращения: 18.03.2025).

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617415. Программа для моделирования интервальной нейронной сети с самообучением по технологии ART, Кучмин А. Ю. (RU), Тарасова И. Л. (RU); заявл. 14.03.2025; опубл. 25.03.2025.

UDC 681.5

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-16-26

EDN: NUDWKF

### Interval ART neural network for clustering images with interval attributes

A. Yu. Kuchmin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Leading Researcher, [orcid.org/0000-0003-0699-6112](https://orcid.org/0000-0003-0699-6112), [radiotelescope@yandex.ru](mailto:radiotelescope@yandex.ru)

S. S. Rasova<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math., Senior Researcher, [orcid.org/0000-0002-1272-1839](https://orcid.org/0000-0002-1272-1839)

I. L. Tarasova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, [orcid.org/0000-0002-2282-150X](https://orcid.org/0000-0002-2282-150X)

<sup>a</sup>Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Science, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** In machine vision systems, experimental data processing, and intelligent system modeling, methods based on adaptive resonance are widely used. These systems can operate under uncertainty, which is described using interval data. However, the existing methods of adaptive resonance theory do not operate with this type of data. **Purpose:** To develop a dynamic neural network based on adaptive resonance theory for the analysis of images with interval-valued attributes and to create its training methods. **Results:** We propose a structure of an interval neural network based on adaptive resonance theory, which enables solving the problem of data clustering in the analysis of multidimensional images with interval-valued attributes under various types of noise and distortions. We develop a computer program to simulate this neural network for solving problems of analyzing multidimensional images with interval-valued attributes. We have conducted Numerical simulation of this interval neural network has been conducted, demonstrating high efficiency in analyzing noisy images. The proposed network possesses self-learning capability. Various models of proximity measures between input patterns and stored patterns in the neural network have been analyzed. We propose three proximity measure models: binary measure, proximity measure 1, and proximity measure 2, which show similar effectiveness. However, proximity measure 2 has demonstrated better accuracy and is recommended as the primary one. **Practical relevance:** The proposed interval neural network can serve as a foundation for machine vision, mobile robots, as well as for creating systems to analyze the configuration of the space in which a robot operates. Furthermore, this neural network can be applied to identify hidden patterns in the analysis of experimental data and can be used in creating information and advisory systems operating under interval uncertainty.

**Keywords** – artificial neural networks, adaptive resonance theory, interval computations, interval neural networks, pattern recognition.

**For citation:** Kuchmin A. Yu., Rasova S. S., Tarasova I. L. Interval ART neural network for clustering images with interval attributes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 16–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-16-26, EDN: NUDWKF

### Financial support

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Science (No. 124041500008-1).

### References

1. Yang C., Wang Q., Lu W., Li Y. Integrated uncertain optimal design strategy for truss configuration and attitude-vibration control in rigid-flexible coupling structure with interval uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 2025, vol. 113, no. 3, pp. 2215–2238. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10291-w>
2. Kalashnikov P. V. Application of the scenario approach to the analysis and control of risks in the operation of complex dynamic systems under conditions of interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 224–236 (In Russian). doi:10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236. Available at: <https://ijournal-as.com/jour/index.php/ijas/article/view/237> (accessed 29 January 2025).
3. Lai Y., Shi Y., Han Y., Shao Y., Qi M., Li B. Exploring uncertainty in regression neural networks for construction of prediction intervals. *Neurocomputing*, 2022, vol. 481, pp. 249–257. doi:10.1016/j.neucom.2022.01.084
4. Noskov S. I., Kirillova T. K., Vedernikov V. S. Weighting of sample observations when constructing a linear regression on data with interval uncertainty for independent variables.

- Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, 2024, no. 4, pp. 51–56 (In Russian). doi:10.17213/1560-3644-2024-4-51-56
5. Sharyi S. P. *Konechomernyi interval'nyi analiz* [Finite interval analysis]. Novosibirsk, XYZ Publ., 2022. 654 p. (In Russian).
  6. Bajenov A. N., Jilin S. I., Kumkov S. I., Sharyi S. P. *Obrabotka i analiz interval'nykh dannykh* [Processing and analysis of interval data]. Moscow, Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2024. 356 p. (In Russian).
  7. Vygodchikova I. Yu., Gorskii M. A., Maksimov D. A., Halikov M. A. *Teoreticheskie podhody i instrumentarii modelirovaniya dinamicheskikh ryadov interval'nykh dannykh* [Theoretical approaches and tools for modeling dynamic series of interval data]. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2025. 184 p. (In Russian).
  8. Chervyakov A. A., Nikulchev E. V. Robust interval time series forecasting. *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 122–128 (In Russian). Available at: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1540> (accessed 18 September 2025).
  9. Bolotnov A. M., Kuptsova A. F. Non-standard interval operations in solving applied problems. *Modern High Technologies*, 2023, no. 2, pp. 17–22 (In Russian). doi:10.17513/snt.39518
  10. Rossi F., Bernardeschi C., Cococcioni M. Neural networks in closed-loop systems: Verification using interval arithmetic and formal prover. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109238>
  11. Canillas S. F., da Silva R. J., Minussi C. R. *Behavioral Diagnosis on Individual Electricity Consumption: Formulation Using a Neural Network Based on Adaptive Resonance Theory*. 2025, 20 p. doi:10.20944/preprints202507.2247.v1. Available at: <https://www.preprints.org/manuscript/202507.2247/v1> (accessed 10 September 2025).
  12. Fedutinov K. A., Kashirina I. L. Development of intelligent decision support tools based on monitoring data. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tehnologii*, 2023, no. 3 (46). Available at: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/article?id=192&ysclid=mfpb0cflzk954566701> (accessed 19 August 2025) (In Russian).
  13. Buhanov D., Chernikov S., Polyakov V., Panchenko M. Detection of video image modification using a classifier based on adaptive resonance theory. *International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems*, Springer, 2022, pp. 23–32. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_3)
  14. Bargsten V., Kirchner F. Actuator-level motion and contact episode learning and classification using adaptive resonance theory. *Intelligent Service Robotics*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 537–548. <https://doi.org/10.1007/s11370-023-00481-7>
  15. Da Silva L. E. B., Rayapati N., Wunsch D. C. iCVI-ARTMAP: Using incremental cluster validity indices and adaptive resonance theory reset mechanism to accelerate validation and achieve multiprototype unsupervised representations. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, vol. 34, no. 12, pp. 9757–9770. doi:10.1109/TNNLS.2022.3160381
  16. Pourpanah F., Lim C. P., Etemad A., Wu Q. J. An ensemble semi-supervised adaptive resonance theory model with explanation capability for pattern classification. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 814–827. doi:10.1109/TETCI.2023.3285932
  17. Czmlil S., Kluska J., Czmlil A. An empirical study of a simple incremental classifier based on vector quantization and adaptive resonance theory. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2024, vol. 34, no. 1, pp. 149–165. doi:10.61822/amcs-2024-0011
  18. Wu W., Hu Y., Xu K., Qin L., Yin Q. Self-organizing memory based on adaptive resonance theory for vision and language navigation. *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 19. <https://doi.org/10.3390/math11194192>. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/19/4192> (accessed 27 August 2025).
  19. Zangana H., Mustafa F. M., Omar M. Advances in adaptive resonance theory for object identification and recognition in image processing. *Jurnal Ilmiah Computer Science*, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 86–100. <https://doi.org/10.58602/jics.v3i2.41>
  20. Zangana H., Mohammed A. K., Omar M., Mustafa F. M., Vitaningsih A. V. Adaptive resonance theory-based approach for robust and efficient face recognition. *Vokasi Unesa Bulletin of Engineering, Technology and Applied Science*, 2025, vol. 2, no. 3, pp. 602–618. <https://doi.org/10.26740/vubeta.v2i3.38709>. Available at: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/vubeta/article/view/38709> (accessed 15 March 2025).
  21. Masuyama N., Nojima Y., Toda Y., Loo C. K., Ishibuchi H., Kubota N. Privacy-preserving continual federated clustering via adaptive resonance theory. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 139692–139710. doi:10.1109/ACCESS.2024.3467114. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10689590> (accessed 18 March 2025).
  22. Kuchmin A. Yu., et al. *Programma dlya modelirovaniya interval'noy neyronnoy seti s samoobucheniem po tekhnologii ART* [A program for simulating an interval neural network with self-learning based on ART technology]. Certificate RU, no. 2025617415, 2025.



## Синтез дальностного портрета объекта на основе моделирования отражательных характеристик его отдельных частей

В. М. Гусаков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший преподаватель, [orcid.org/0009-0003-3679-3209](https://orcid.org/0009-0003-3679-3209), [St\\_325@mail.ru](mailto:St_325@mail.ru)

Ю. Ф. Матасов<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0003-2435-8365](https://orcid.org/0009-0003-2435-8365)

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

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

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

**Введение:** при создании систем управления на транспорте необходима информация о наблюдаемых объектах, в том числе в радиолокационном диапазоне. Моделирование с помощью электродинамических пакетов для этих целей связано с большим объемом вычислений, что для сложных объектов приводит к использованию допущений, вследствие чего результаты моделирования не соответствуют реальным характеристикам объекта. **Цель:** разработать метод получения радиолокационного изображения объекта на основе расчетов отражательных характеристик его отдельных составных частей. **Результаты:** разработанный метод заключается в разбиении исходного сложного объекта на части, радиолокационные изображения которых после уменьшения эффективных площадей появившихся кромок за счет добавления дополнительных элементов рассчитываются отдельно. Далее из изображений удаляется информация о дополнительных элементах, появившихся после разбиения, после чего из результатов удаления восстанавливается итоговое изображение объекта. Разбиение модели на две части позволит параллелизировать вычисления, а также уменьшить вычислительные затраты при изменении одной из них, например при нанесении диэлектрического слоя на скругленную сторону. Благодаря методу получен дальностный портрет тестовой модели в виде скругленного с одной стороны цилиндра путем разбиения ее на две части поперек оси цилиндра. **Практическая значимость:** за счет составления дальностного портрета объекта на основе дальностных портретов его частей экономятся вычислительные мощности при создании цифровых двойников технических изделий, а также ускоряется процесс производства конечного продукта.

**Ключевые слова** – радиолокационное изображение, дальностный портрет, эффективная площадь рассеяния, синограмма.

**Для цитирования:** Гусаков В. М., Матасов Ю. Ф., Иванов М. Е. Синтез дальностного портрета объекта на основе моделирования отражательных характеристик его отдельных частей. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 27–35. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-27-35, EDN: RLYFIA

**For citation:** Gusakov V. M., Matasov Yu. F., Ivanov M. E. Synthesis of a radar range portrait of an object based on modeling the reflective characteristics of its individual parts. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 27–35 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-27-35, EDN: RLYFIA

### Введение

В настоящее время разрешающая способность современных радиолокационных станций (РЛС), в том числе в составе систем помощи водителю, позволяет не просто определить дальность до цели и ее эффективную площадь рассеяния (ЭПР), но и получить ее дальностный и поляризационный портреты. Возможность получения совокупности уникальных признаков объекта и применение современных алгоритмов обработки информации [1, 2] способствуют созданию эффективных систем поддержки принятия решений, в том числе для систем автономного управления движением транспорта [3, 4]. В то же время для распознавания и классификации наблюдаемых объектов необходима априорная информация об их сигнатурах в виде базы данных [5, 6], заполнение которой может производиться разными способами [7]: непосредственным многократным наблюдением

типовых объектов, измерениями радиолокационных характеристик (РЛХ) объектов или их макетов с использованием радиолокационных измерительных комплексов, а также расчетами РЛХ 3D-моделей объектов с помощью электродинамических пакетов [8, 9]. Непосредственное наблюдение объектов удобно при движении по одному маршруту, но обычно не позволяет получить все ракурсы, а порой оно вообще невозможно. При всей убедительности измерений с использованием радиолокационных измерительных комплексов [10, 11] экспериментальные методы определения РЛХ объектов требуют оборудования специальных полигонов или безэховых камер, сложной аппаратуры, самого объекта или его макета, больших затрат времени и средств [12]. Пакеты моделирования электродинамических задач (САПР) доказали свою эффективность при решении задач рассеяния электромагнитных волн на телах различной формы и широко используются как на

этапе проектирования для формования необходимого облика объекта перед проведением измерений с использованием радиолокационных измерительных комплексов [13, 14], так и для оценки РЛХ объектов на основе информации об их внешнем виде.

В работе рассмотрены особенности получения радиолокационного изображения объекта с использованием электродинамических пакетов.

### Краткие теоретические сведения

При расчете в пакетах электродинамического моделирования диаграмм обратного рассеяния (ДОР) на определенной частоте результатами вычислений являются комплексные значения напряженностей электрического поля  $E$  в зависимости от углов наблюдения  $\theta$  и  $\varphi$  в сферической системе координат, как правило, представленные в виде массива:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \text{Re}(\mathbf{E}_{\theta_1}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\theta_1}) & \text{Re}(\mathbf{E}_{\varphi_1}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\varphi_1}) \\ \theta_2 & \text{Re}(\mathbf{E}_{\theta_2}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\theta_2}) & \text{Re}(\mathbf{E}_{\varphi_1}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\varphi_1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_1 & \text{Re}(\mathbf{E}_{\theta_1}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\theta_1}) & \text{Re}(\mathbf{E}_{\varphi_2}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\varphi_2}) \\ \theta_2 & \text{Re}(\mathbf{E}_{\theta_2}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\theta_2}) & \text{Re}(\mathbf{E}_{\varphi_2}) & \text{Im}(\mathbf{E}_{\varphi_2}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot (1)$$

Результаты решения позволяют рассчитать эффективную площадь рассеяния объекта на определенной частоте:

$$\sigma = 4\pi r^2 \left( \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} \right)^2,$$

где  $r$  – расстояние до объекта;  $E_{\text{пад}}$  и  $E_{\text{отр}}$  – напряженности падающего и отраженного электрических полей.

Для формирования дальностного портрета необходимо произвести вычисления ДОР в диапазоне рабочих частот, чтобы получить отраженный сигнал, аналогичный зондирующему сигналу РЛС с линейно-частотной модуляцией:

$$S(t) = S_0 \cos \left\{ \varphi_0 + 2\pi \left( f_0 + \frac{b}{2} t^2 \right) \right\},$$

где  $S_0$  – амплитуда сигнала;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Коэффициент  $b$ , являющийся тангенсом угла наклона частоты, определяется соотношением

$$b = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{T_s},$$

где  $f_{\text{max}}$  и  $f_{\text{min}}$  – максимальная и минимальная частота линейно-частотно-модулированного сигнала;  $T_s$  – период сигнала.

Полученные результаты, как правило, для фиксированного угла  $\varphi$  далее пересчитываются в коэффициенты отражения, для чего сначала находится вектор напряженности электрического поля как сумма проекций на оси координат, который потом делится на значение вектора напряженности падающего поля:

$$\mathbf{S}_{\text{отр}}(f_i, \theta_i) = \frac{\left( 2\pi \sqrt{\mathbf{E}_0^2(f_i, \theta_i)_i + \mathbf{E}_\varphi^2(f_i, \theta_i)} \right)}{\mathbf{E}_{\text{пад}}}. (2)$$

Формируется матрица коэффициентов отражения в диапазоне углов и частот:

$$\mathbf{S}_{\text{отр}}(f, \theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\text{отр}}(f_1, \theta_1) & \mathbf{S}_{\text{отр}}(f_1, \theta_2) & \dots \\ \mathbf{S}_{\text{отр}}(f_2, \theta_1) & \mathbf{S}_{\text{отр}}(f_2, \theta_2) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. (3)$$

Далее по столбцам необходимо произвести обратное преобразование Фурье, тем самым представив сигнал во временной области [15, 16]:

$$\mathbf{S}_t(\Delta t, \theta, \varphi) = FT(\mathbf{S}_f(f, \theta, \varphi)), (4)$$

где  $\mathbf{S}_t$  и  $\mathbf{S}_f$  – представление сигнала от цели во временной и частотной областях;  $FT$  – функция преобразования Фурье.

На последнем этапе пересчитываются полученные отчеты времени в расстояния:

$$\mathbf{S}_t(\Delta t, \theta) \rightarrow \left[ \Delta r = f \frac{c}{2F} \right] \rightarrow \mathbf{S}_{\text{image}}(\Delta r, \theta). (5)$$

Графическое изображение полученной матрицы коэффициентов отражения в виде синопграммы представляет собой дальностный портрет цели в диапазоне углов наблюдения.

В результате получения дальностного портрета локальные центры отражения будут разнесены по дальности, если расстояние между ними будет больше разрешающей способности, зависящей в рассматриваемом случае от полосы частот.

### Метод получения радиолокационного изображения объекта на основе расчетов отражательных характеристик его отдельных составных частей

Объем вычислений и оперативной памяти, необходимый для решения задачи рассеяния при использовании электродинамических пак-

тов, определяется соотношением геометрии объекта и длины электромагнитной волны, характеристиками используемых материалов и окружающего пространства, а также выбранным на основе предыдущих данных методом расчета. Далее геометрическая модель разбивается на элементарные элементы – фацеты, для каждого из которых производятся индивидуальные расчеты [17]. От количества фацетов и алгоритма расчета зависит время моделирования. Для крупных объектов из-за огромного количества фацетов доступны только асимптотические методы расчета, при этом в качестве материала объекта должен быть выбран идеальный проводник. Добавление диэлектрических элементов, например солнечных батарей или композитных материалов, в модель объекта приводит к укорочению длины волны в этом слое [18] и значительному увеличению количества фацетов, в результате чего расчеты даже на современной ЭВМ будут занимать несколько недель или даже месяцев.

Ускорение процесса расчетов ДОР объектов ограничено тем, что получаемые значения напряженности электрического поля представляют собой сумму напряженностей электрических полей волн, отраженных от локальных центров рассеяния [19]:

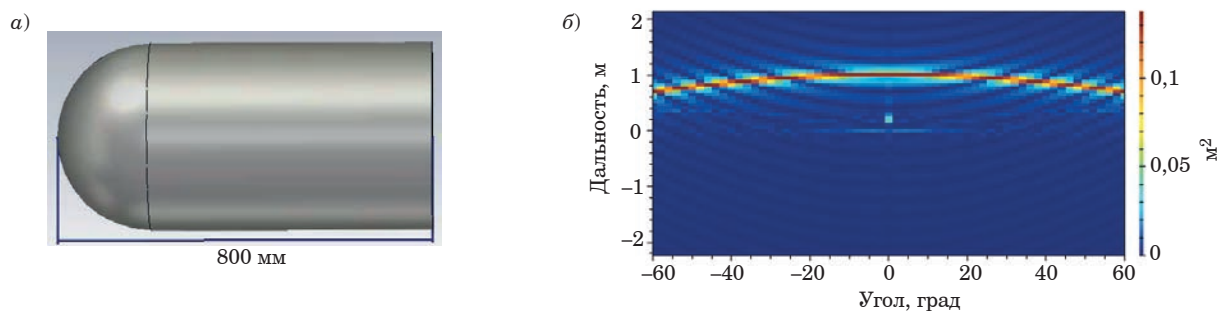
$$\vec{E}_{\text{сум}}(\theta, \varphi) = \sum \vec{E}_i(\theta, \varphi), \quad (6)$$

вследствие чего в результатах расчета ДОР на каждой частоте нет информации об отдельных локальных центрах отражения. При расчете ДОР в полосе частот вычисления можно распараллелить на несколько ЭВМ, каждая при этом будет производить вычисления в своей полосе частот. Такой подход может ускорить процесс расчета ДОР объектов при условии, если ресурсы отдельной ЭВМ позволяют произвести расчеты модели. В противном случае приходится упрощать исходную модель, что может привести к несоответствию реальной и расчетной ДОР.

В качестве альтернативы упрощения исходной модели в статье предлагается разбить исследуемый объект на несколько частей, между которыми нет переотражений. Тогда объем вычислений для отдельной части будет меньше, чем для всего объекта. Также при изменении одной части, например нанесении диэлектрического покрытия или изменении геометрии, не нужно будет пересчитывать отражательные характеристики всего объекта. Однако в этом случае нельзя просто соединить отдельные изображения из-за появления дополнительных локальных центров рассеяния на местах разделения частей. Причем дополнительные локальные центры могут значительно выделяться на фоне объекта.

Предлагаемый метод основан на том, что преобразование Фурье является линейным оператором, и удаление части радиолокационного изображения из синограммы приведет к удалению соответствующих спектральных составляющих. Таким образом, после удаления из изображений отдельных элементов объекта области, не связанных с самим объектом (новые плоскости и кромки), путем простого поэлементного сложения полученных после удаления информации новых элементов возможно получить изображение самого объекта. Так как эффективная площадь появляющихся в результате разделения объекта кромок достаточно большая, то для уменьшения искажения синтезируемого изображения полученные новые кромки частей исходного объекта предлагается заменить на менее заметные, например сферу или цилиндр.

В качестве примера использования метода представлена тестовая геометрическая модель объекта (рис. 1, а) в виде цилиндра из идеального проводника длиной 800 мм и диаметром 400 мм, одна из сторон которого скруглена, а также его синограмма (рис. 1, б) в полосе частот 9–11 ГГц и диапазоне углов  $\pm 60^\circ$ . Углу  $0^\circ$  соответствует положение модели, при котором электромагнитная волна падает на скругленную сторону вдоль оси цилиндра. Расчет произведен



■ **Рис. 1.** Геометрическая модель объекта (а) и его синограмма (б)  
 ■ **Fig. 1.** Geometric model of the object (а) and its synogram (б)

в САПР CST Studio Suite асимптотическим методом с дискретностью частоты 20 МГц и шагом угла поворота 2°. Для построения синограмм использовалось авторское программное обеспечение, созданное на основе соотношений (1)–(6).

На синограмме в диапазоне всех углов наблюдения хорошо заметна сферическая часть объекта, так как сфера имеет одинаковую ЭПР во всех углах наблюдения, в длинноволновой области равную  $\sigma = \pi a^2 = 0,126 \text{ м}^2$ , где  $a$  – радиус сферы.

Значение ЭПР сферической части исследуемого объекта на синограмме порядка 0,13 м<sup>2</sup>, что соответствует теоретическим расчетам. Также на графике заметен след задней кромки. Расстояние от первой блестящей точки до задней кромки порядка 0,8 м, что также соответствует геометрии модели.

Также при углах, близких к 60°, появляется след от боковой части цилиндра, ЭПР которой также соответствует теоретическим расчетам, а именно:

$$\sigma = \frac{2\pi a l^2}{\lambda} \sin(60^\circ) \left[ \frac{\sin(kl \cos 60^\circ)}{kl \cos 60^\circ} \right]^2 = 0,00248 \text{ м}^2,$$

где  $l$  – длина цилиндра (200 мм);  $\lambda$  – длина волны (3 см);  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Исходная модель была поделена на две части одинакового размера поперек оси вращения, синограммы полученных частей рассматриваемого объекта находятся в полосе частот 9–11 ГГц.

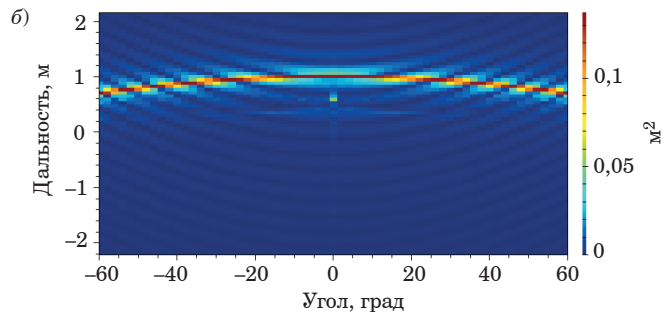
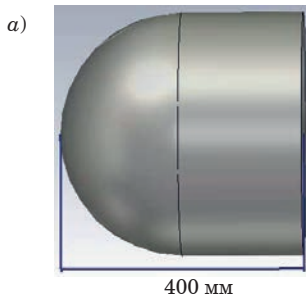
Первая половина представляет собой укороченный вариант исходной модели (рис. 2, а). Как и следовало ожидать, заметно изменилась только длина объекта – след от задней кромки сместился выше на 400 мм (рис. 2, б). Также пропал след от боковой поверхности цилиндра, который из-за малых размеров боковой стенки цилиндра слился со следом сферы и немного заметен только при углах около 60°.

Вторая половина представляет собой цилиндр (рис. 3, а), у которого диаметр совпадает с длиной боковой части.

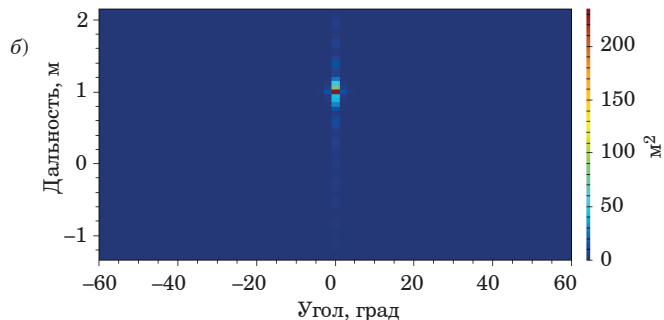
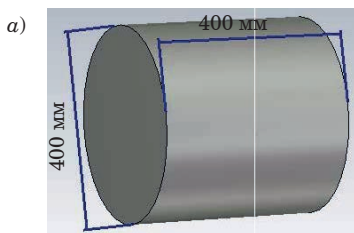
При угле наблюдения 0° имеется яркий след от передней части полученного цилиндра (рис. 3, б), уровень ЭПР которого соответствует ЭПР диска диаметром 400 мм:

$$\sigma = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2} = 220,5 \text{ м}^2,$$

где  $\lambda$  – длина волны (3 см);  $a$  – радиус цилиндра.



■ **Рис. 2.** Геометрическая модель первой половины объекта (а) и ее синограмма (б)  
 ■ **Fig. 2.** Geometric model of the first half of the object (а) and its synogram (б)



■ **Рис. 3.** Геометрическая модель второй половины объекта (а) и ее синограмма (б)  
 ■ **Fig. 3.** Geometric model of the second half of the object (а) and its synogram (б)

Значение ЭПР боковой части цилиндра при угле  $60^\circ$  практически равно ЭПР боковой части первой половины объекта ( $0,00248 \text{ м}^2$ ).

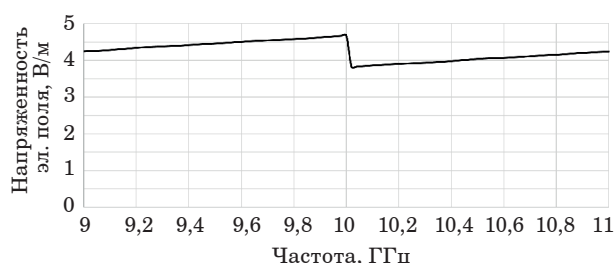
Поскольку значение ЭПР боковой части на несколько порядков меньше максимального значения ЭПР цилиндра, то на синопамме наблюдается только его плоская часть.

Также на синопамме в диапазоне углов  $\pm 5^\circ$  наблюдаются боковые всплески вдоль оси дальности, из-за которых удаление только локального центра отражения от основания цилиндра с изображения не позволит удалить информацию о нем и корректно соединить изображения частей исходной модели.

Например, ЭПР локального центра отражения цилиндра при угле наблюдения  $0^\circ$  составляет  $220 \text{ м}^2$ , а значение первого бокового лепестка на расстоянии  $0,4 \text{ м}$  от него примерно  $13 \text{ м}^2$ , что все равно на два порядка больше ЭПР исходного объекта (см. рис. 1). На этом же расстоянии находится и задняя кромка цилиндра, след от которой наблюдается на исходной синопамме. В связи с этим просто удалить боковую составляющую с изображения некорректно, так как потеряется информация об остальных элементах.

Зависимость напряженности электрического поля, отраженного от цилиндра при угле наблюдения  $0^\circ$ , от частоты, из которой при обратном преобразовании Фурье с использованием соотношений (5) и (6) на синопамме получится локальный центр отражения от диска (передняя часть цилиндра), представлена на рис. 4. Для упрощения процедуры удаления информации о данном локальном центре допустим, что зависимость равномерна во всей полосе частот и при всех углах наблюдения, поэтому в первом приближении информацию о локальном центре отражения рассмотрим как совокупность прямоугольных импульсов на частотной оси.

Тогда в результате преобразования Фурье во временной области локальные центры рассеяния



■ **Рис. 4.** Зависимость напряженности электрического поля, отраженного от цилиндра при угле наблюдения  $0^\circ$ , от частоты

■ **Fig. 4.** The dependence of the E-field strength reflected from a cylinder at an observation angle of  $0^\circ$  on the frequency

представляют собой не просто точки в пространстве, а функции вида  $\sin x/x$ . Расстояния между боковыми лепестками полученных функций во временной области обратно пропорциональны полосе частот (ширине импульса). В таком случае для удаления информации о локальном центре рассеяния необходимо из изображения вычесть все составляющие для каждого угла наблюдения.

Сравнение результатов аппроксимации боковых составляющих функцией вида  $\sin x/x$  со значениями ЭПР, полученными на основе рассчитанных данных, приведено на рис. 5, а. Разница между значениями составляет не более  $3 \text{ дБ}(\text{м}^2)$ , за исключением области  $0 \text{ м}$  и нулей аппроксимирующей функции, которые выражены более глубоко, что необходимо дополнительно принять при расчетах. Несовпадения в нулях возможно учесть, например, подбором цифрового фильтра и аппроксимацией полиномом на этих участках.

Но из-за того, что уровень ЭПР передней кромки цилиндра и его боковых составляющих гораздо выше отражения от задней кромки, как и ЭПР в целом исходного объекта, ошибка результата аппроксимации в  $1 \%$  все равно не позволит корректно восстановить исходный объект.

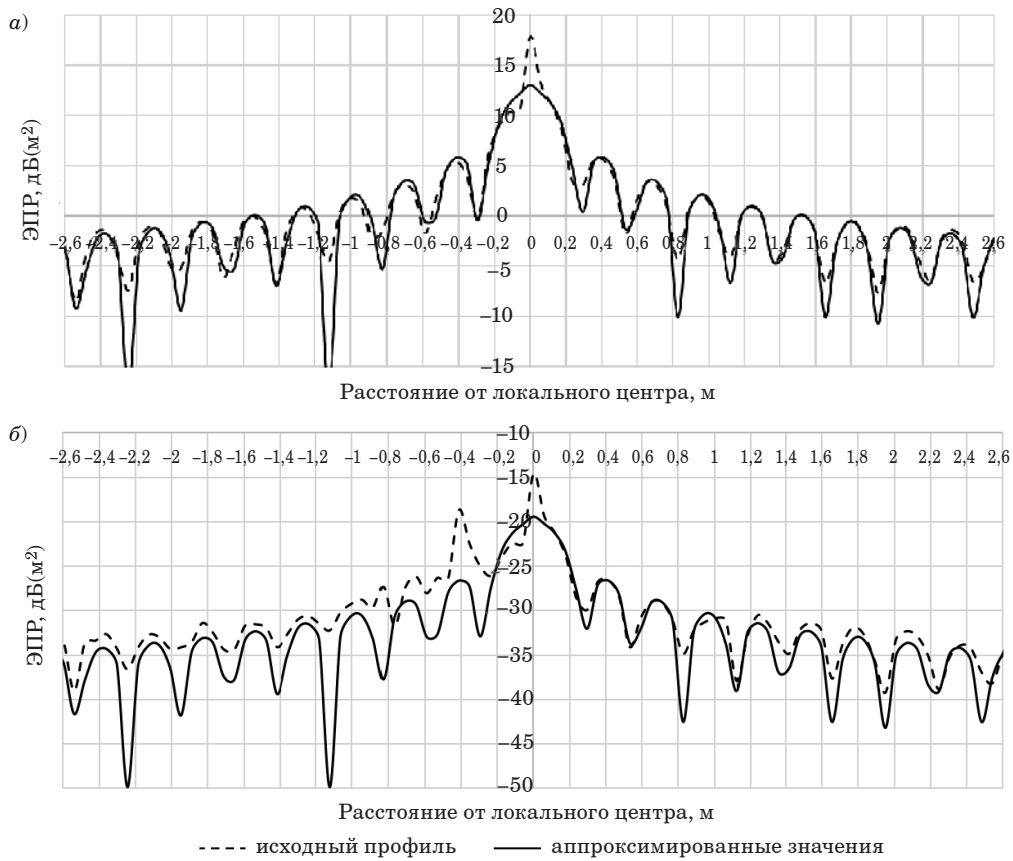
Для решения указанной проблемы необходимо, чтобы ЭПР получаемых в результате разделения новых локальных центров отражения были соизмеримы с исходными. В качестве решения в работе предложено добавить полусферу к передней части цилиндра. Результат расчета дальностного портрета при угле  $0^\circ$  и аппроксимации боковых составляющих функцией  $\sin x/x$  представлен на рис. 5, б. Отражение от задней кромки наблюдается на расстоянии  $0,4 \text{ м}$ , что соответствует геометрии объекта.

Также в сравнении с рис. 5, а наблюдается большее несоответствие графиков между собой. Это связано с тем, что в дальностном профиле стали заметны составляющие от задней кромки цилиндра.

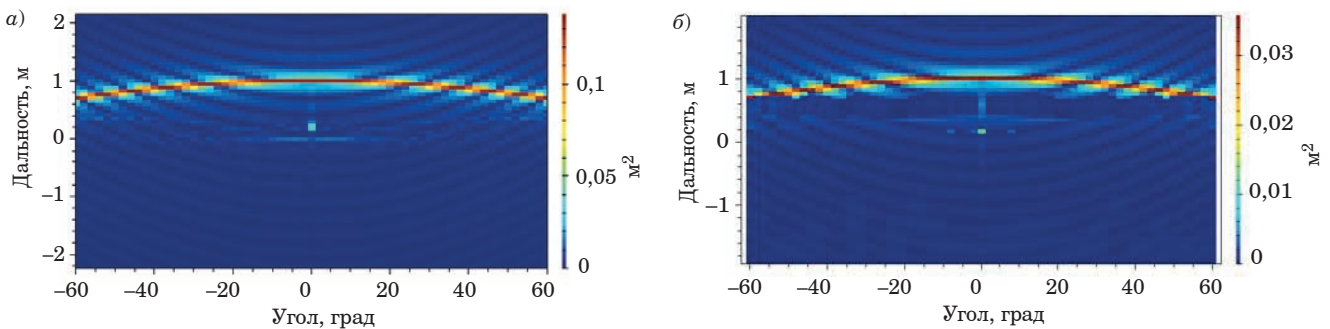
Таким образом, для удаления локального центра рассеяния с изображения необходимо провести следующие операции:

- для каждого угла наблюдения найти максимум локального центра, который необходимо удалить;
- определить период следования боковых составляющих локального центра рассеяния по расстоянию между соседними максимумами;
- определить параметр  $x$  функции  $\sin x/x$ ;
- провести процедуру удаления информации о локальном центре рассеяния путем вычитания результатов расчета из исходных значений.

Для восстановления исходной синопаммы необходимо провести поэлементное сложение значений ЭПР полученных массивов данных.



■ **Рис. 5.** Зависимость ЭПР цилиндра (а) и цилиндра со сферой (б) от дальности с нулевым углом наблюдения на основе рассчитанных данных и в результате аппроксимации боковых составляющих функцией вида  $\sin x/x$   
 ■ **Fig. 5.** The dependence of the EPR of the cylinder (a) and the cylinder with sphere (b) on the range at an observation angle of  $0^\circ$  based on the calculated data and as a result of the approximation of the lateral components by a  $\sin x/x$  function



■ **Рис. 6.** Синограммы исходного (а) и сборного (б) объектов  
 ■ **Fig. 6.** Synograms of the original (a) and composite (b) objects

Синограммы исходного объекта, а также результат соединения отдельных частей с вычетом из изображений локальных центров отражения от разреза представлены на рис. 6, а и б.

Уровень ЭПР сферической части на сборной синограмме соответствует уровню на исходной. На сборной синограмме наблюдаются искажения между передней и задней кромками объекта.

Также немного увеличился уровень ЭПР от задней кромки.

### Заклучение

Рассмотренный подход к построению радиолокационного изображения объекта на основе

его частей позволяет произвести необходимые расчеты в случае, когда средств ЭВМ не хватает, чтобы сделать это для целого объекта, или его параметрами возможно варьировать, а также ускорить расчеты при моделировании объектов с частичным нанесением покрытий, когда есть

несколько вариантов таких покрытий. При выборе места разделения необходимо учитывать взаимное расположение соседних локальных центров рассеяния относительно друг друга, их ЭПР, а также отсутствие переотражений между элементами отдельных частей.

## Литература

1. **Казанцев А. А.** Методика формирования радиолокационных изображений космических объектов на основе комплексирования методов сверхразрешения. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, 2017, № 3, с. 35–43. EDN: ZTBZZJ
2. **Кугина А. В., Свердлов Б. Г.** Информативные радиолокационные сигнальные признаки БПЛА и птиц. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2018, № 7, с. 64–68. EDN: XTLYQH
3. **Кольцов Ю. В.** Автомобильные РЛС на кристалле. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2021, т. 75, № 10, с. 48–75. doi:10.18127/j20700784-202110-04, EDN: VCYJFF
4. **Головачев М. В., Биусова В. А., Бондаренко А. В., Кочетов А. В., Панфилов П. С., Парусов В. А., Сарычев В. А.** Автомобильная СКИ РЛС контроля дорожной обстановки в сложных метеоусловиях. *Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн*, Муром, 28–30 мая 2019 г. Муром, 2019, с. 434–437. EDN: VVPLKN
5. **Антонов Д. А., Нестеренко О. Е., Оркин В. В.** Моделирование процесса распределения вычислительных ресурсов при автоматизированном обнаружении, распознавании и каталогизировании космических объектов. *Информация и космос*, 2021, № 4, с. 83–87. EDN: MZQKXA
6. **Каменев А. А., Самородов А. А.** Применение баз данных по космической фоноцелевой обстановке для реализации технологии информационной поддержки ОЭС наблюдения в процессе жизненного цикла. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, 2017, № 2, с. 11–18. EDN: KAIFYS
7. **Васильев О. В., Жуков М. Н., Потапов Р. А., Ситников А. Г.** Особенности создания банка данных радиолокационных эталонных портретов сигналов, отраженных от воздушных целей. *Радиотехника*, 2010, № 7, с. 57–60. EDN: NBGVAX
8. **Погорельский И. В., Луканов А. В., Цветков В. К.** Разработка программного комплекса синтеза и имитации целей для радиолокационных систем малой и средней дальности для систем активной помощи водителю. *Радиолокация и связь – перспективные технологии: сборник трудов XVIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции*, Москва, 17 декабря 2020 г. М., Мир науки, 2021, с. 72–76. EDN: DIFFAH
9. **Филиппских Е. Э., Попов А. В., Галкин Ф. А., Лимарев А. Д.** Методика формирования радиолокационных портретов (сигнатур) объектов сложной пространственной конфигурации с проводящей поверхностью. *Информация и космос*, 2022, № 1, с. 20–27. EDN: BUZZZD
10. **Сысоев Д. О., Ершова К. А.** К вопросу оценки метрологических характеристик радиолокационных измерительных комплексов. *Метрологическое обеспечение инновационных технологий: IV Международный форум: сборник статей*, Санкт-Петербург, 04 марта 2022 г. СПб., СПбГУАП, 2022, с. 162. EDN: NIYJMF
11. **Михайлов Д. Б., Чадин А. В., Медведева В. С.** Отдельные вопросы метрологического обеспечения радиолокационных измерительных комплексов. *Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ: в 5 т.*, Воронеж, 18–20 апреля 2023 г. Воронеж, 2023, с. 363–366. EDN: VBSKDS
12. **Медведев И. Н.** Метод уменьшения погрешности измерений эффективной площади рассеяния. *Вестник метролога*, 2022, № 3, с. 26–29. EDN: IVYUKG
13. **Разицкий С. Н., Богословский А. В., Борисов Д. Н.** Сравнительный анализ отражательных свойств цилиндров с полной и частичной металлизацией боковых поверхностей. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2021, № 19, с. 302–310. doi:10.24412/2500-4352-2021-19-302-310, EDN: STIYWA
14. **Михайлов Д. Б., Медведев И. Н.** Результаты математического моделирования радиолокационных отражателей, применяемых для измерений эффективной площади рассеяния. *Вестник метролога*, 2023, № 4, с. 17–19. EDN: RYTEBF
15. **Тонких А. Н., Кузнецова В. А.** Математическое моделирование радиолокационных изображений, формируемых радиолокационной станцией с синтезированной апертурой антенны. *Радиотехника*, 2025, т. 89, № 4, с. 89–100. doi:10.18127/j00338486-202504-08
16. **Бердышев В. П., Помазуев О. Н., Савельев А. Н., Смолкин М. А.** Алгоритмы построения двумерных радиолокационных изображений воздушных объектов в интересах распознавания. *Вестник Военной академии воздушно-космической обороны*, 2017, № 2, с. 90–101.

17. Патент № 2835989 С1 Российская Федерация, МПК G06Т 15/06. *Способ быстрого имитирования радиолокационных изображений*, А. Г. Прохоров, И. М. Ярцев, А. В. Дмитриев. Заявл. 28.06.2024; опубл. 07.03.2025.; заявитель Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники». EDN: NULNWX

18. Гусаков В. М., Москалев В. М., Невзоров В. И. Обзор подходов к определению угла прохождения электромагнитной волны через границу воздух-диэлектрик с потерями. *СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК*, 2020, № 1(75), с. 12–13.

19. Кобак В. О. *Радиолокационные отражатели*. М., Сов. радио, 1975. 248 с.

UDC 621.396.96

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-27-35

EDN: RLYFIA

### Synthesis of a radar range portrait of an object based on modeling the reflective characteristics of its individual parts

V. M. Gusakov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Lecturer, orcid.org/0009-0003-3679-3209, St\_325@mail.ru

Yu. F. Matasov<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0003-2435-8365

M. E. Ivanov<sup>b</sup>, Assistant Professor, orcid.org/0000-0002-7584-6946

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

**Introduction:** When creating telematics control systems, information about the observed objects is required, including that within the radar range. The use of electromagnetic modeling for these purposes is associated with extensive computations. For complex objects, this leads to assumptions with which the modeling results do not correspond to the actual characteristics of the object. **Purpose:** To develop a method for obtaining a radar image of an object under study based on the reflective characteristics of its individual components. **Results:** The developed method consists in dividing the initial complex object into parts, radar images of which, after reducing the effective areas of the edges that appear because of adding additional elements, are calculated separately. Next, information about additional elements that appeared after the division is removed from the images, after which the final image of the object is restored from the results of the removal. Dividing the model into two parts makes it possible to parallelize the calculations, as well as to reduce the computational costs when one of them changes, for example, when a dielectric layer is applied to a rounded side. The method allows obtaining a radar range portrait of a test model in the form of a cylinder that is rounded on one side, by dividing it into two parts across the cylinder's axis. **Practical relevance:** The described method for creating a radar range portrait of an object not only saves computing power while creating digital twins of technical products, but can also accelerate the production process of the final product.

**Keywords** – radar image, radar range portrait, effective scattering area, sinogram.

**For citation:** Gusakov V. M., Matasov Yu. F., Ivanov M. E. Synthesis of a radar range portrait of an object based on modeling the reflective characteristics of its individual parts. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 27–35 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-27-35, EDN: RLYFIA

### References

- Kazantsev A. A. Super resolution technique for inverse synthetic aperture radar imaging of space objects. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2017, no. 3, pp. 35–43 (In Russian). EDN: ZTBZZJ
- Kutina A. V., Sverdlov B. D. Informative radar signal specifiers of UAVs and birds. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2018, no. 7, pp. 64–68 (In Russian). EDN: XTLYQH
- Koltzov Yu. V. Car radars on chip. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*, 2021, vol. 75, no. 10, pp. 48–75 (In Russian). doi:10.18127/j20700784-202110-04, EDN: VCYJFF
- Golovachev M. V., Biyusova V. A., Bondarenko A. V., Kochetov A. V., Panfilov P. S., Parusov V. A., Sarychev V. A. Car ultrashort pulse radar for road conditions control in difficult meteorological conditions. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokacii, rasprostraneniya i difrakcii voln* [Proceedings of the All-Russian Open Armed Readings “Modern problems of remote sensing, radar detection, wave propagation, and diffraction”]. Murom, 2019, Murom Institute of Vladimir State University, pp. 434–437 (In Russian). EDN: VVPLKN
- Antonov D. A., Nesterenko O. Ye., Orkin V. V. Modeling the process of distribution of computing resources in the automated detection, recognition and cataloging of space objects. *Information and Space*, 2021, no. 4, pp. 83–87 (In Russian). EDN: MZQKXA
- Kamenev A. A., Samorodov A. A. Space objects database signature application to realization technology for information support optoelectronic system at various stages of life cycle. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2017, no. 2, pp. 11–18 (In Russian). EDN: KAIFYS
- Vasilyev O. V., Zhukov M. N., Potapov R. A., Sitnikov A. G. Features of creating a database of radar reference portraits of signals reflected from air targets. *Radioengineering*, 2010, no. 7, pp. 57–60 (In Russian). EDN: NBGVAX
- Pogorel'skij I. V., Lukanov A. V., Tsvetkov V. K. Development of a program complex for synthesis and simulation of targets for short-range and medium-range radar systems for active driver assistance systems. *Radiolokaciya i svyaz' – perspektivnye tekhnologii* [Proceedings of the XVIII All-Russian Youth Scientific and Technical Conference “Radar and communication are promising technologies”]. Moscow, 2020, pp. 72–76 (In Russian). EDN: DIFFAH
- Philippskih E. E., Popov A. V., Galkin F. A., Limarev A. D. Technique of complex objects with conductive surface radar portraits (signatures) formation. *Information and Space*, 2022, no. 1, pp. 20–27 (In Russian). EDN: BUZZZD
- Sysoev D. O., Ershova K. A. To the question of evaluation of metrological characteristics of radar measuring complexes. *Sbornik statej IV Mezhdunarodnogo foruma “Metrologicheskoe obespechenie innovacionnykh tekhnologii”* [Collection of articles of the IV International Forum “Metrological sup-

- port of innovative technologies”]. Saint Petersburg, 2022, p. 162 (In Russian). EDN: NIYJMF
11. Mihallov D. B., Chadin A. V., Medvedeva V. S. Separate issues of metrological support of radar measuring complex. *Sbornik trudov XXIX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU “Radiolokaciya, navigaciya, svyaz”* [Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference “Radar, navigation, communications”]. Voronezh, 2023, pp. 363–366 (In Russian). EDN: VBSKDS
  12. Medvedev I. N. Reduction method of measurement error of the scattering cross-section of radar measurement systems. *Vestnik metrologa*, 2022, no. 3, pp. 26–29 (In Russian). EDN: IVYUKG
  13. Razinkov S. N., Bogoslovskiy A. V., Borisov D. N. Comparative analysis of the cylinders reflective properties with full and partial metallization of the side surfaces. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2021, no. 19, pp. 302–310 (In Russian). doi:10.24412/2500-4352-2021-19-302-310, EDN: STIYWA
  14. Mikhaylov D. B., Medvedev I. N. Determination of metrological characteristics of measuring instruments of geometric leveling at the places of their operation. *Vestnik metrologa*, 2023, no. 4, pp. 17–19 (In Russian). EDN: RYTEBF
  15. Tonkikh A. N., Kuznetsova V. A. Mathematical modeling of radar images formed by synthetic-aperture radar. *Radioengineering*, 2025, vol. 89, no. 4, pp. 89–100 (In Russian). doi:10.18127/j00338486-202504-08, EDN: WOTEQX
  16. Berdyshev V. P., Pomazuev O. N., Savel`ev A. N., Smolkin M. A. Algorithms for constructing two-dimensional radar images of air objects for recognition purposes. *Vestnik Voennoj akademii vozdushno-kosmicheskoy oborony*, 2017, no. 2, pp. 90–101 (In Russian). EDN: YMCCWP
  17. Prokhorov A. G., et al. *Sposob bystrogo imitirovaniya radiolokacionnyh izobrazhenij* [Method for fast imitation of radar images]. Pat. RU 2835989 C1, 2024. EDN: NULNWX
  18. Gusakov V. M., Moskalev V. M., Nevzorov V. I. Overview of approaches to determining the angle of passage of an electromagnetic wave through an air-dielectric interface with losses. *Trudy ezhegodnoj NTK “Rossijskoe nauchno-tehnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi”* [Proceedings of the annual Scientific and Technical Conference “Russian scientific and technical society of radio engineering, electronics and communication”]. Saint Petersburg, 2020, no. 1(75), pp. 12–13 (In Russian).
  19. Kobak V. O. *Radiolokacionnye otrazhateli* [Radar reflectors]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. 248 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.



## Разработка моделей для расчета задержек доступа к контенту с учетом кеширования в сетях NDN

С. И. Якименко<sup>а</sup>, преподаватель, младший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-0698-1298](https://orcid.org/0000-0002-0698-1298), [syakimenko@hse.ru](mailto:syakimenko@hse.ru)

<sup>а</sup>Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова НИУ ВШЭ, Таллинская ул., 34, Москва, 123458, РФ

**Введение:** кеширование позволяет снизить задержку доступа к контенту с помощью его приближения к пользователям и разгрузки облачного уровня сети. Для этого применяются граничные серверы, однако стандартный стек TCP/IP не использует возможность кеширования полностью, поэтому необходимо рассмотреть модель кеша, который задействует более приспособленный для данной функции стек Named Data Networking. **Цель:** разработать модели для оценки задержек доступа к контенту с учетом особенностей кеширования на граничном узле в Named Data Networking. **Результаты:** предложены имитационная модель с реализацией алгоритма кеширования Least Recently Used на основе дискретно-событийного моделирования и математическая модель задержек получения контента. Модели дают возможность адекватно оценить задержку на каждом сегменте от пользователя до облака и в целом для системы, а также вычислить основные характеристики работы кеша: вероятность попадания в кеш, нагрузку на внешние и внутренние каналы. Кеширование на основе граничного сервера позволило снизить задержку доступа к контенту до 65 мс и уменьшить издержки оператора на обращения в удаленное облако до 60 %. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть применены интернет-провайдерами и операторами связи для разгрузки магистральных каналов и повышения показателей качества обслуживания абонентов при скачивании популярного контента. **Обсуждение:** в исследовании рассмотрен сценарий с большим каталогом и пуассоновским потоком запросов на граничный кеш, что соответствует режиму, в котором вероятность агрегации запросов в таблице Pending Interest Table мала. Для изучения динамического эффекта агрегации на задержки доступа к контенту требуется более сложная модель трафика (например, ON-OFF или модель дробового шума), что является предметом дальнейших исследований.

**Ключевые слова** — кеширование, Least Recently Used, задержка, non-zero download delay, граничное кеширование, Named Data Networking, имитационное моделирование, облако.

**Для цитирования:** Якименко С. И. Разработка моделей для расчета задержек доступа к контенту с учетом кеширования в сетях NDN. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 36–48. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-36-48, EDN: TYQXCS

**For citation:** Iakimenko S. I. Development of models for calculating content access delays with account taken of caching in NDN networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-36-48, EDN: TYQXCS

### Введение

В последнее время создание пользователями Интернета все большего и большего объема «тяжелого» цифрового контента, а также повышение скорости передачи данных в беспроводных сетях вызывает чрезмерный спрос на ограниченные сетевые ресурсы. Высокая нагрузка на сетевую инфраструктуру и пиринговые стыки приводит к тому, что в сетях ухудшаются параметры качества обслуживания абонентов.

Одним из решений для разгрузки транзитных каналов является перенос вычислительных мощностей из ядра и удаленного облака на границу сети в рамках концепции периферийных вычислений (edge computing) [1]. В задачи, которые выполняются на Edge-уровне сети, могут входить фильтрация, предварительная обработка данных, а также их кеширование и вычисления в реальном времени.

Согласно Стратегии развития отрасли связи Российской Федерации (<http://static.government.ru/media/files/Pc7fHuejbNvqv17b0RJNv0RIqTo201UV.pdf>), доля выполняемых центрами обработки данных «граничных» вычислений к 2035 г. составит до 30 % общего объема вычислений в центрах обработки данных, а доля трафика между центрами обработки данных заметно возрастет. В общем случае архитектура гетерогенной сети с учетом Edge-уровня может включать несколько дополнительных уровней, между которыми с помощью проводных и беспроводных интерфейсов устанавливается множество горизонтальных и вертикальных связей. Например, в нее могут быть включены шлюзы доступа к сети для оконечных устройств, несколько звеньев Edge-серверов различной мощности, а также центры обработки данных для сбора перед облаком. Немало работ исследователей посвящены различным аспектам применения новых решений на границе сети [2], например обеспечению вы-

числений [3, 4], безопасности в автомобильных сетях [5].

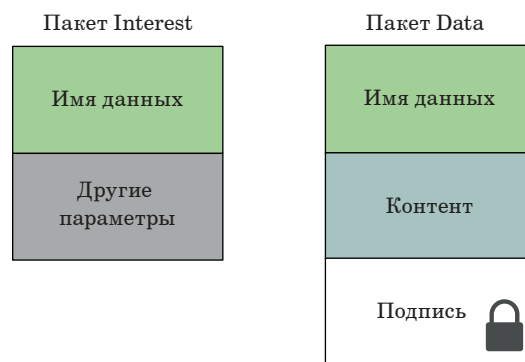
Перспективным решением для разгрузки удаленного облака при обработке запросов на ресурсы сети является граничное кеширование. Кеширование трафика контент-ориентированных социальных сетей (VK Video, Rutube, YAPPY и т. д.) может быть особенно полезным, поскольку существует высокая корреляция в контенте, который запрашивают пользователи. В итоге на замкнутой территории один и тот же популярный видеофайл могут просматривать несколько пользователей одновременно. При этом стандартное для стека TCP/IP прокси-кеширование в условиях мобильности пользователей и динамической беспроводной среды менее эффективно по сравнению со стационарным подключением [1].

Среди иностранных крупных исследователей, заявивших о концептуальной необходимости перехода от стека TCP/IP к сетям, ориентированным на информацию, или информационно-центричным сетям (ICN), можно выделить Дж. Куроуза (J. Kurose) [6], В. Якобсена (V. Jacobsen) [7] и Л. Чжанг (L. Zhang) [8]. На предпосылки разработки новых протоколов сетевого уровня в сетях поколения 5G/6G указывали такие известные российские ученые, как А. Е. Кучерявый, Р. В. Киричек, А. Ю. Гребешков [9, 10]. Работы авторов Г. Хасслингера (G. Hasslinger) [11], К. Фрикер (C. Fricker) [12] известны сильным вкладом в теоретические основы кеширования в ICN, а статьи М. Гаретто (M. Garretto) [13], М. Амадео (M. Amadeo) [2, 14] посвящены внедрению информационно-ориентированных концепций в телекоммуникационную инфраструктуру.

### Сети именованных данных

Сети именованных данных (Named Data Networking, NDN) являются одной из новых альтернативных архитектур, упоминаемой в рекомендации RFC 8793 “Information-Centric Networking (ICN): Content-Centric Networking (CCNx) and Named Data Networking (NDN) Terminology” (<https://datatracker.ietf.org/doc/rfc8793/>). Начало передачи данных в NDN инициируется принимающей стороной, т. е. потребителем данных (Data Consumer). В свою очередь производит данные отправляющая сторона, т. е. производитель данных (Data Producer). Пакет с запросом данных называется Interest. Пакет с данными, которые «запрашивает» Interest, называется Data (рис. 1).

Таблица Forwarding Information Base (FIB) является аналогом стандартной таблицы маршрутизации имен для NDN-сети. Таблица ожидания Pending Interest Table (PIT) указывает на список



■ **Рис. 1.** Структура пакетов Interest и Data в сети NDN

■ **Fig. 1.** Structure of Interest and Data packets in the NDN network

запросов Interest, которые еще не были удовлетворены, и интерфейсы, ожидающие на них ответ. Также на каждом NDN-узле существует структура Content Store (CS), которая и является кешем определенного размера. Кеширование пакетов на промежуточных и конечных устройствах является одним из преимуществ NDN-сети. Результативный запрос в кеш NDN, т. е. нахождение пакета с необходимым именем в кеше, называется попаданием кеша (cache hit). В случае, если нахождение пакета не произошло, говорят о промахе кеша (cache miss) [15].

В статьях [16–19] результаты для оценки влияния кеширования на работу сети были получены с помощью имитационного моделирования в симуляторах. Утверждалось [16], что NDN-сеть без кеша на узлах сама по себе не может удовлетворять требованиям по задержкам большинства современных приложений. Некоторые соображения по учету различного типа задержек приведены в статье [17] применительно к их влиянию на пропускную способность смоделированной сети NDN. В работе [18] был сделан общий вывод, что различные стратегии кеширования позволяют снизить задержку доставки объектов данных получателю и нагрузку на канал. К похожему результату пришли авторы статьи [19], где говорится, что применение механизмов NDN в mesh-сети помогает сохранять задержку на уровне не более 50 мс, причем сокращение становится более значительным для контента, популярность которого ранжирована по закону Ципфа.

Модели кеширования разделяются на категории ZDD (Zero-Download-Delay) и Non-ZDD (Non-Zero-Download-Delay). В модели ZDD для упрощения предполагается, что если нужный элемент контента (ЭК) отсутствует в кеше, он мгновенно загружается с удаленного ресурса. Второй случай более реалистичен и предполагает, что с момента запроса на ЭК до получения пользовате-

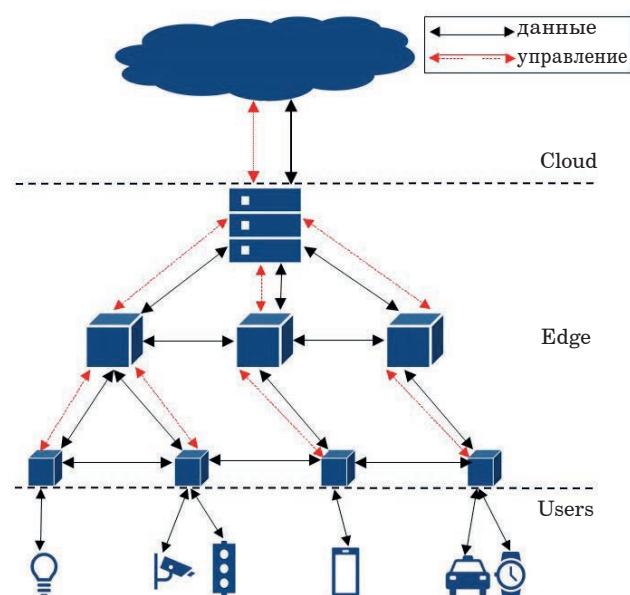
лем данного ЭК происходит некоторая задержка. Важную роль в данном процессе играет PIT: если в течение времени загрузки контента на него приходит еще несколько запросов, то все они не отправляются на уровень вверх, а накапливаются в данной таблице. После поступления пакета Data на узел благодаря накоплению запросов в PIT пакет рассылается всем устройствам, которые ранее его запросили. Задержка загрузки, таким образом, является параметром, влияющим на эффективность кеширования.

При этом в научной литературе зачастую задержки задаются значениями-константами, которые берутся из измерений на сети или даются без обоснования. Общим недостатком в таком случае является разрозненность значений, которые выбираются авторами. Так, например, в работе [20] рассматриваются три сценария с выбором все более удаленного облака. Задержка до уровня Edge во всех случаях равна 1 мс, а задержка до облака Cloud последовательно увеличивается от 20–30 до 80 мс, причем задается реальными измерениями на сети. В статье [21] задаются задержки между базовой станцией и Edge-сервером (0,5 мс), а также Edge-сервером и облаком (2 мс), без учета пользовательской задержки. Похожий подход предложен и в [22], где берутся во внимание только задержки между Edge-уровнем и Cloud (от 10 до 100 мс). Константы для задержек (в микросекундах) на каждом из сегментов 5G-сети с поддержкой Edge-уровня предлагаются в статье [23]. Методика по обоснованию значений задержки для обработки видеопотока реального времени на Edge-сервере приведена в статье [24], которую можно считать самой близкой к текущей работе. Однако статья [24] посвящена TCP/IP-сети и не учитывает влияние кеширования внутри сети на результаты, что в данной работе учтено.

Таким образом, существует необходимость в развитии математического аппарата для моделей работы сети в альтернативных TCP/IP-архитектурах для обоснования выигрыша для задержки от кеширования. Актуальной становится задача разработки математической и имитационной модели для обоснования расчета задержек, которая учитывает особенности кеширования на базе NDN.

### Системная и математическая модели кеширования с учетом условия Non-ZDD

Рассмотрим процесс получения данных из кеша, работающего через протокол NDN, с учетом задержки (рис. 2). Уровень Edge для упрощения представлен единственным сервером. На первом этапе пакет-запрос Interest отправляется на уровень Edge с размером кеша  $C$ . Если на данном



■ **Рис. 2.** Архитектура гетерогенной сети с учетом Edge-уровня  
 ■ **Fig. 2.** Architecture of a heterogeneous network considering the Edge layer

уровне происходит попадание кеша, то в сторону оконечного устройства (ОУ; User Equipment, UE) обратно продвигается пакет Data. Если происходит промах кеша на Edge, запрос отправляется на уровень Cloud, где он удовлетворяется в любом случае. Согласно стандартам NDN, данный пакет должен пройти по тем же промежуточным узлам, по которым двигался и пакет Interest.

Предположим, что узел Cloud содержит все элементы контента из каталога размером  $M$ . Предположим также, что каждый оконечный узел соединен с узлом Cloud через линейную топологию, подразумевающую отсутствие горизонтальных связей между узлами Edge одного уровня.

Для разработки модели примем следующие допущения.

1. На вход кеша поступает пуассоновский поток запросов с общей интенсивностью  $\Lambda$ , при этом интенсивность запроса элемента  $i \in [1, M]$ ,  $i \in \mathbb{N}$ , пропорциональна популярности:

$$\lambda_i = \Lambda p_i. \quad (1)$$

2. Популярность  $p_i$  запросов одинакова в любой момент времени симуляции и в любой географической точке, а также не зависит от предыдущих запросов. Для упрощения размеры всех элементов контента равны [5] (условие Independent Reference Model), что является общепринятым допущением для исследований алгоритмов кеширования [11].

3. Популярность  $p_i$  запросов на элементы контента распределена по закону Ципфа с коэффициентом асимметрии  $\alpha = 0,8$ . Распределение Ципфа точно характеризует популярность запросов на пользовательский контент, при этом значение коэффициента  $\alpha$  для разных сценариев колеблется в пределах от 0,65 до 1,2, а  $\alpha = 0,8$  является одним из чаще всего используемых в литературе [12]:

$$p_i = \frac{i^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^M k^{-\alpha}}. \quad (2)$$

4. Политика вытеснения кеша – Least Recently Used (LRU), политика же репликации контента – Leave Copy Everywhere (LCE) [25], т. е. при обращении на уровень Cloud ЭК не только отправляется в сторону ОУ, но и реплицируется на уровне Edge для следующих запросов с вероятностью 100 %.

5. Как показано в работе [26], при пуассоновском потоке заявок значимое влияние РИТ на сокращение восходящего трафика наблюдается при относительно небольшом размере каталога контента или высокой интенсивности запросов на отдельный объект. В рассматриваемой модели РИТ практически не ограничивает поток запросов к кешу и облаку.

При данных предположениях для оценки вероятности попадания в кеш LRU  $p_{hit}(i)$  применяется аппроксимация Че [13]. Согласно ей, для каждого элемента  $i$  в каталоге выполняется приближенное равенство

$$p_{hit}(i) \approx 1 - e^{-\lambda_i T_C}, \quad (3)$$

где  $T_C$  – среднее время жизни («характеристическое время» Че) элементов в кеше размера  $C$ ,  $C \leq M$ . При этом время  $T_C$  предполагается одинаковым для всех элементов.

Однако с учетом условия Non-ZDD формула для вероятности попадания требует модификации. В работе [27] предложена следующая корректировка, учитывающая среднее время скачивания объекта  $M(D_{Down})$ :

$$p_{hit}(i) \approx \frac{e^{\lambda_i T_C} - 1}{\lambda_i M(D_{Down}) + e^{\lambda_i T_C}}. \quad (4)$$

Поскольку «характеристическое время» входит в выражения (3), (4) для вычисления  $p_{hit}(i)$  нелинейно, это значение можно вычислить численными методами. Например, для условия ZDD имеем уравнение относительно  $T_C$

$$\sum_{i=1}^M p_{hit}(i) = \sum_{i=1}^M \left(1 - e^{-\lambda_i T_C}\right) = C. \quad (5)$$

Для получения общего значения  $p_{hit}$  по кешу используется средневзвешенная сумма

$$p_{hit} = \sum_{i=1}^M P_i p_{hit}(i). \quad (6)$$

Общая задержка  $D_{Down}$  – это время, которое проходит с момента отправки запроса Interest до получения пакета информации Data. Оно может быть разделено на четыре части:

- 1) время запроса ( $D_1$ ) – время с момента генерации запроса Interest ОУ до получения данного запроса узлом Edge;
- 2) время отправки пакета Data на ОУ ( $D_2$ );
- 3) время запроса Interest на уровень вверх ( $D_3$ ) – опциональное время, необходимое для пересылки запроса Interest на Cloud, если он не удовлетворен в кеше Edge;
- 4) время отправки пакета Data на уровень вниз ( $D_4$ ) – опциональное; Data-пакет движется по обратному пути.

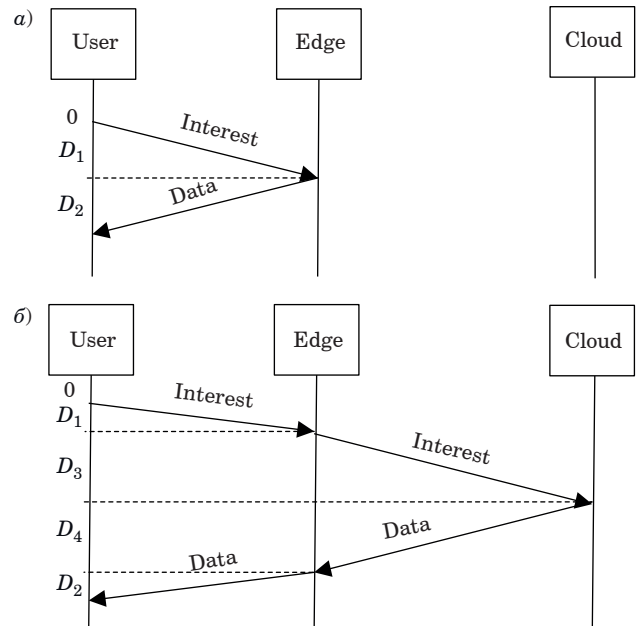
Временная диаграмма, отражающая попадание в кеш, представлена на рис. 3, а, временная диаграмма для промаха кеша приведена на рис. 3, б.

Таким образом, в случае попадания в кеш имеем соотношение

$$D_{Down\_hit} = D_1 + D_2, \quad (7)$$

в случае же промаха кеша имеем

$$D_{Down\_miss} = D_1 + D_2 + D_3 + D_4. \quad (8)$$



■ Рис. 3. Временная диаграмма работы кеша: а – попадание; б – промах

■ Fig. 3. Cache operation timing diagram: a – hit; б – miss

Примем задержку на каждом этапе случайной величиной, распределенной экспоненциально со средними значениями  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  и  $\mu_4$  (где  $\mu_i$  – интенсивность обслуживания на  $i$ -м этапе соответственно в секундах в минус первой степени). Экспоненциальное распределение адекватно моделирует время обслуживания в системах, где возможны случайные задержки из-за ошибок передачи, повторных запросов или флуктуации нагрузки, что типично для сетевых каналов [28]. Распределение суммы независимых экспоненциальных случайных величин подчиняется распределению Кокса. Этот класс распределений является плотным в множестве всех распределений на неотрицательной полуоси [29]. Это означает, что, варьируя параметры модели (число этапов, интенсивность), можно аппроксимировать произвольное распределение задержек, что сохраняет общность подхода. Распределение Кокса также позволяет оценивать общую задержку через ее математическое ожидание, которое является устойчивой и интерпретируемой характеристикой для сравнения сценариев.

Общее время обработки пакета, таким образом, можно описать с помощью фазовой модели, представленной в виде диаграммы Кокса (рис. 4).

Характеристическую функцию (эквивалентную преобразованию Лапласа – Стилтгеса) времени задержки для данной фазовой модели можно получить, анализируя граф переходов [29]:

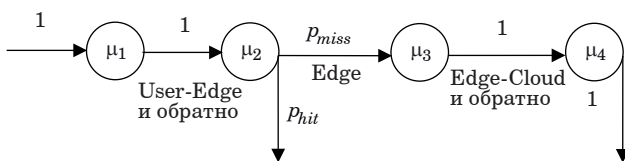
$$F(s) = p_{hit} \left( \frac{\mu_1}{\mu_1 + s} \right) \left( \frac{\mu_2}{\mu_2 + s} \right) + p_{miss} \left( \frac{\mu_1}{\mu_1 + s} \right) \left( \frac{\mu_2}{\mu_2 + s} \right) \left( \frac{\mu_3}{\mu_3 + s} \right) \left( \frac{\mu_4}{\mu_4 + s} \right), \quad (9)$$

где  $s$  – комплексный параметр преобразования Лапласа – Стилтгеса ( $s \in C$ ).

Математическое ожидание случайной величины задержки находится по формуле [29]

$$M(D_{Down}) = \sum_{i=1}^4 \frac{q_i}{\mu_i} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \frac{p_{miss}}{\mu_3} + \frac{p_{miss}}{\mu_4}, \quad (10)$$

где  $q_i$  – вероятность того, что пакет пройдет  $i$ -ю фазу на своем пути. Для данной диаграммы  $q_1 = 1, q_2 = 1, q_3 = p_{miss}, q_4 = p_{miss}$ .



■ **Рис. 4.** Четырехфазная диаграмма Кокса, моделирующая путь пакета

■ **Fig. 4.** 4-phase Cox diagram modeling the packet path

Дисперсия случайной величины задержки [29]

$$D(D_{Down}) = 2 \sum_{i=1}^4 \left( \left( \sum_{j=1}^i \frac{1}{\mu_j} \right) \frac{q_i}{\mu_i} \right) - M^2(D_{Down}). \quad (11)$$

Окончательно получим

$$D(D_{Down}) = 2 \left( \begin{aligned} & \frac{1}{\mu_1^2} + \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) \frac{1}{\mu_2} + \\ & + \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_3} \right) \frac{p_{miss}}{\mu_3} + \\ & + \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_3} + \frac{1}{\mu_4} \right) \frac{p_{miss}}{\mu_4} \end{aligned} \right) - M^2(D_{Down}). \quad (12)$$

Полученные аналитические выражения (10), (12) задают первые два момента распределения времени доставки контента. Сравнение теоретических значений с результатами симуляции представлено далее.

### Реализация модели

Для нахождения величин  $D_1 = \mu_1^{-1}, D_2 = \mu_2^{-1}, D_3 = \mu_3^{-1}$  и  $D_4 = \mu_4^{-1}$  (в секундах) примем, что на каждом этапе  $D_n, n \in [1, 4]$  задержка передачи пакета в общем случае состоит из следующих компонентов:

1) задержки доступа пакета к каналу  $D_{ac}$  – времени между его генерацией и концом текущего кадра (опциональное, относится только к первому этапу);

2) задержки сериализации  $D_{ser}$ , или постановки пакета в очередь на передачу;

3) задержки ожидания в очереди  $D_{queuing}$ ;

4) задержки передачи пакета  $D_{tr}$ :

$$D_n = D_{ac} + D_{ser} + D_{queuing} + D_{tr}. \quad (13)$$

Для вычисления задержки генерации пакета рассмотрим систему TDMA (Time Division Multiple Access), состоящую из  $K$  пользователей, каждый из которых передает пакеты одинаковой длины по  $S$  бит каждый. Если общая скорость передачи составляет  $R$  бит/с, то время сериализации пакета  $D_{ser} = S/R$ , что примем за размер слота. Длительность всего цикла, таким образом, составляет  $D_{II} = KS/R$ . Предполагаем, что процессы прибытия новых пакетов у разных пользователей независимы, тогда очереди пакетов от каждого пользователя не влияют на очереди других пользователей. Пользователь передает пакет, если он у него есть, каждые  $D_{II}$  секунд, независимо от любого события в любой из других

очереди других пользователей. Следовательно, в дальнейшем мы сосредоточимся на характеристиках одного пользователя и, не умаляя общности, предположим, что пользователь передает пакет, если он у него есть, в первом слоте каждого кадра.

Поскольку все кадры имеют одинаковую длину, среднее время между временем генерации пакета и концом текущего кадра составляет  $D_{ac} = 0,5D_{ц} = KS/2R$ .

Будем считать, что линии связи обладают большим запасом пропускной способности, поэтому задержкой обработки в очереди  $D_{queuing}$  пренебрежем.

Пусть  $L$  – физическое расстояние между узлами,  $v$  – скорость распространения бит по линии связи. При этом в оптоволокне, ведущем на уровень Cloud, имеем  $v = nc$ , где  $n$  – показатель преломления света.

Пусть также длина одного участка оптоволокна  $L_{hop} = 100$  км. При передаче пакета каждые  $n_{hop} = \lfloor L/L_{hop} \rfloor$  участков пакет также испытывает дополнительную задержку, связанную с оптическим-электрооптическим (О/Е/О) преобразованием сигнала и обработкой в таблицах маршрутизации на промежуточном роутере  $D_{proc}$ .

Итого для задержки передачи пакета имеем

$$D_{tr} = \frac{L}{v} + n_{hop}D_{proc}. \quad (14)$$

На участке сети между граничным маршрутизатором и конечным пользователем (часто называемом «последней милей»)  $L_{edge} \ll L$ , поэтому для запроса, ведущего к уровню Edge и обратно, данной задержкой пренебрежем. Тогда формулу (7) можно переписать так:

$$D_{Down\_hit} = D_{ac} + 2D_{ser}. \quad (15)$$

В свою очередь формула (8) принимает вид

$$D_{Down\_miss} = D_{ac} + 4D_{ser} + 2D_{tr}. \quad (16)$$

Средние значения времени обслуживания на каждом этапе соответственно равны:

$$\mu_1^{-1} = \frac{KS}{2R} + \frac{S}{R} = \frac{KS + 2S}{2R}; \quad (17)$$

$$\mu_2^{-1} = \frac{S}{R}; \quad (18)$$

$$\mu_3^{-1} = \mu_4^{-1} = \frac{S}{R} + \frac{L}{nc} + n_{hop}D_{proc}. \quad (19)$$

Таким образом, предложенная параметризация (17)–(19) устанавливает связь между харак-

теристиками сети и параметрами распределения Кокса  $\mu_i$ , что позволит в дальнейшем исследовать влияние физических параметров сети на результирующую задержку доставки контента.

## Имитационное моделирование

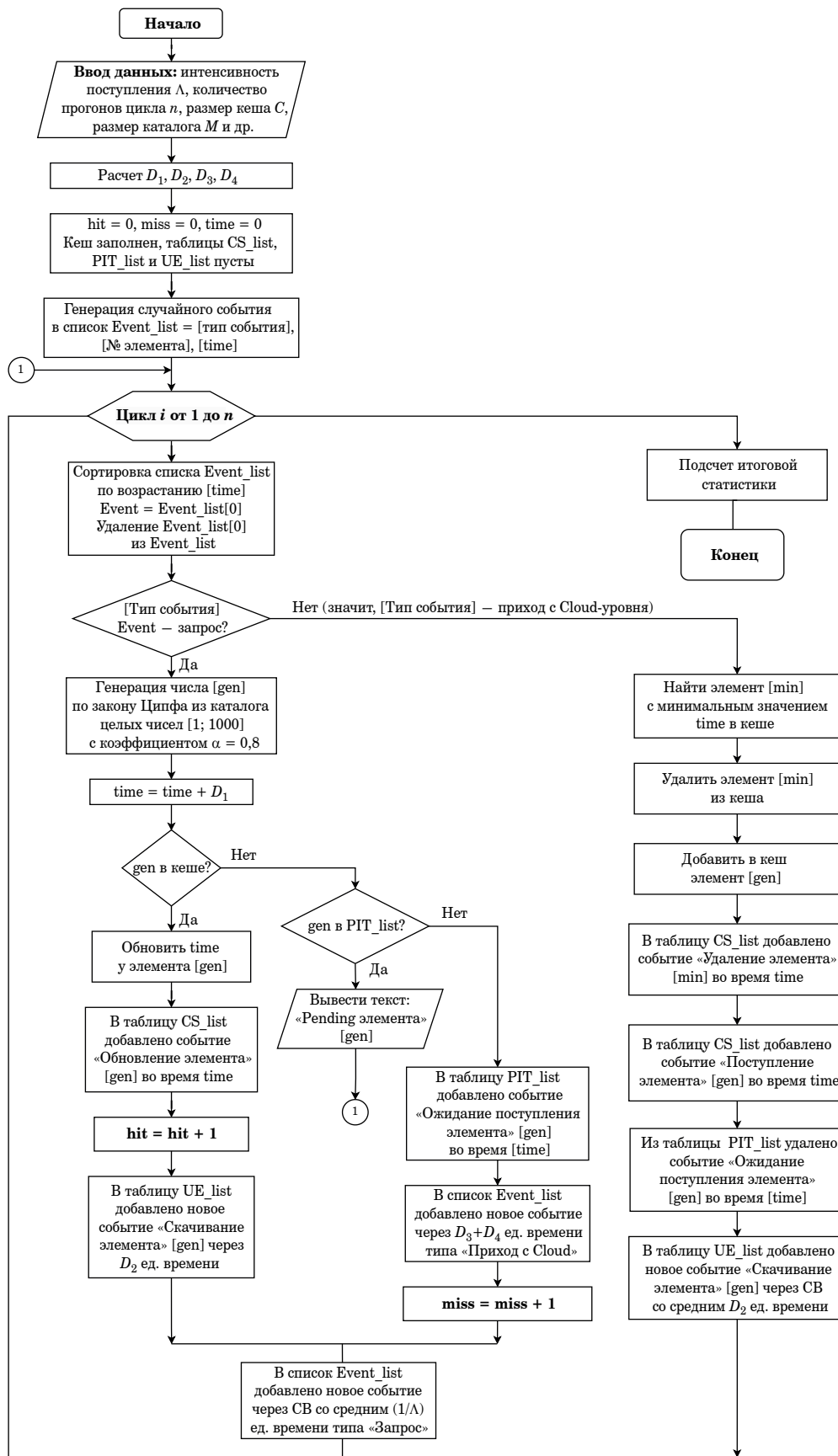
Автором разработан алгоритм, учитывающий особенности как кеша LRU, так и всех компонентов узла NDN (рис. 5). Для имитационного моделирования работы политики LRU использован подход дискретно-событийного моделирования с переменным шагом продвижения модельного времени.

На каждом прогоне к переменной продвижения модельного времени *time* добавляется случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону со средним  $1/\Lambda$  единиц. Список *Event\_list* определяет ближайшее по модельному времени событие, которое будет обрабатываться алгоритмом. Перед основным циклом кеш предварительно заполнен недублирующимися элементами контента для установления стационарного режима [11]; в блок-схеме для экономии места этот процесс не описан.

Имитационная модель разработана на языке Python 3.11 в среде Jupyter Notebook. Численные расчеты и генерация случайных величин выполнены с помощью библиотек NumPy и SciPy. Все эксперименты проводились на рабочей станции с ОС Ubuntu 20.04 LTS, процессором Intel Core i5 и 16 ГБ ОЗУ. Код модели доступен по запросу у автора.

Состояния кеша реализованы с помощью класса OrderedDict модуля Collections в языке Python – для упорядочиваемых словарей. В словарях хранятся элементы вида {ключ: значение}. Ключом в словаре является число *gen*, значением – время *time*. Таким образом, пара {*gen*; *time*} обозначает состояние кеша, при котором в нем хранится элемент ранга *gen*, последний запрос к которому произошел во время *time*. Если в кеш попадает ЭК с таким же ключом, его время будет обновлено. Если же такого ключа в кеше нет, то будет вытеснен элемент с наименьшим значением *time*, а на его место попадет новый ЭК.

На вход кеша поступает поток заявок по закону Пуассона с интенсивностью  $\Lambda$  заявок/с. Заявки промаркированы с помощью числа *gen*. Данное число сгенерировано по закону Ципфа из каталога целых чисел 1, 2, ...,  $M$  с коэффициентом асимметрии  $\alpha = 0,8$  и обозначает ранг элемента в каталоге  $M$ . Входные параметры, упоминаемые в блок-схеме: размер кеша  $C = 100$ , размер каталога  $M = 500$ , количество прогонов основного цикла  $n = 2000$ . Остальные численные параметры указаны в таблице.



■ **Рис. 5.** Алгоритм основного цикла для кеша NDN по правилу LRU:  $CB$  – случайная величина  
 ■ **Fig. 5.** The main loop algorithm for the NDN cache using the LRU rule:  $CB$  is a random variable

- Начальные численные параметры для вычисления задержек
- Initial numerical parameters for calculating delays

Параметр	Значение
Скорость передачи данных $R$ на сегменте до пользователя, Мбит/с	100
Размер пакета Interest $S_{Interest}$ , байт	50
Размер пакета Data $S_{Data}$ , байт	1500
Пользователи $K$ на уровне Users	5
Скорость света $c$ в вакууме, м/с	$3 \cdot 10^8$
Показатель преломления света $n$ в оптоволокне	1,46
Общее расстояние $L$ до уровня Cloud, км	2000
Длина сегмента оптоволокна $L_{hop}$ , км	100
Дополнительная задержка на сегменте $D_{proc}$ , мс	1,5
Общая интенсивность запросов на кеш $\Lambda$ , заявок/с	15

В блоке «Подсчет итоговой статистики» рассчитываются следующие параметры:

- время «жизни» пакета  $i$  в кеше,  $T_i$ , его среднее «характеристическое значение»  $T_C = M(T_i)$  и СКО  $\sigma(T_i)$ ;

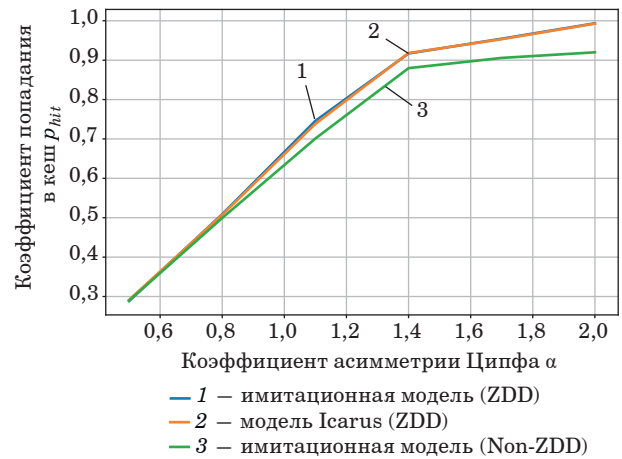
- коэффициент попадания в кеш  $hit/(hit + miss)$  по результатам моделирования и по формуле (4) с учетом Non-ZDD;

- размер кеша по формуле Че по формуле (5);
- средняя задержка скачивания пакета Data, ее дисперсия и математическое ожидание с помощью функций  $variance()$  и  $stdev()$  модуля Statistics. В симуляторе также реализованы списки  $cs\_list$ ,  $pit\_list$ ,  $ue\_list$ , хранящие основные события для сбора статистики в структурах Content Store и PIT на узле Edge, а также OУ.

Валидация модели

### Валидация модели

Для проверки корректности реализации имитационной модели была выполнена серия тестовых экспериментов. Так, проведено сравнение с симулятором кэширования Icarus (<https://icarus-sim.github.io/>) по коэффициенту попадания в кеш LRU. В Icarus не поддерживается моделирование условия Non-ZDD, а параметры задаются через конфигурацию эксперимента (модули *workload* и *topology*). Для модели в Icarus были реализованы идентичные условия из таблицы (топология, размер каталога и кеша, нагрузка), за переменный параметр был взят коэффициент  $\alpha \in [0,5; 2]$ . При отключенном условии Non-ZDD ( $D_3 = D_4 = 0$ ) вероятность попадания в кеш имитационной мо-



■ Рис. 6. Вероятность попадания в кеш  $p_{hit}$  как функция коэффициента Ципфа  $\alpha$

■ Fig. 6. Cache hit probability  $p_{hit}$  as a function of the Zipf coefficient  $\alpha$

дели количественно согласуется с результатами в Icarus (рис. 6, кривые 1 и 2). Разница не более 3 % позволяет утверждать, что алгоритм LRU в имитационной модели реализован корректно, а дальнейшие эксперименты с учетом условия Non-ZDD отражают именно влияние задержки скачивания, а не побочные эффекты.

Дополнительно на рис. 6 приведена кривая 3 для модели с включенным условием длительной загрузки ( $M(D_{down}) = 0,1$  с). При активации условия Non-ZDD наблюдается снижение вероятности попадания в кеш. Этот эффект усиливается с ростом  $\alpha$ : при слабом перекосе ( $\alpha < 1$ ) снижение составляет около 1–2 %, при сильном перекосе ( $\alpha = 2$ ) достигает 8 %. В условиях такого перекоса популярности основная доля запросов приходится на небольшую группу ЭК, которые при большой задержке доступа систематически не успевают попадать в кеш после вытеснения.

### Результаты моделирования

При первоначальных параметрах получим результаты, согласующиеся с реальными измерениями на Edge-Cloud-сети [20]:  $\mu_1^{-1} = 14$  мс;  $\mu_2^{-1} = 4$  мс;  $\mu_3^{-1} = \mu_4^{-1} = 38,6$  мс; математическое ожидание задержки  $M(D_{Down}) \approx 56,86$  мс; дисперсия задержки  $D(D_{Down}) \approx 3,2$  мс; средняя задержка при попадании в кеш  $D_{Down\_hit} = 18$  мс; при промахе кеша  $D_{Down\_miss} = 95$  мс. Таким образом, основная часть задержки получения контента формируется при обращении в удаленное облако.

Начнем эксперименты со сменой параметров. При  $\alpha = 1,1$  будем увеличивать размер кеша от 25 до 225 элементов с шагом 25 при одинако-

вом размере каталога. В данном эксперименте проверим точность формул дисперсии (12) и математического ожидания (10) задержек в математической модели в сравнении с разработанным симулятором (рис. 7).

Как видим, увеличение размера кеша на уровне Edge постепенно уменьшает среднюю задержку скачивания контента. Получены результаты уменьшения задержки порядка десятков миллисекунд (от 57 до 27 мс).

При вычислении средней абсолютной ошибки (mean absolute error, MAE) и средней относительной ошибки (mean relation error, MRE) соответствующих задержек в математической и имитационной моделях получены значения:

$$MAE(M(D_{Down})) = 0,000709;$$

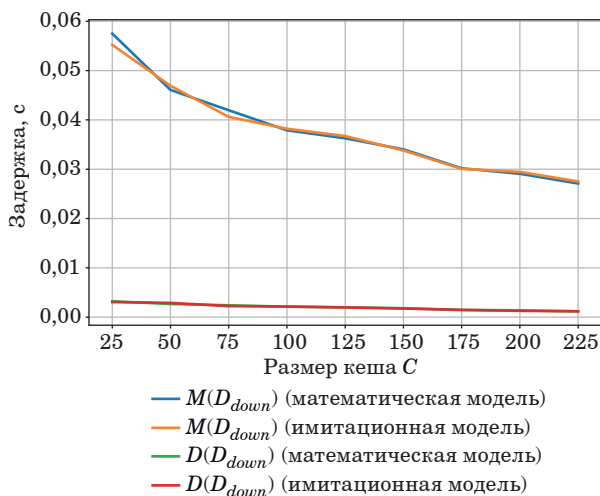
$$MAE(D(D_{Down})) = 0,000087.$$

$$MRE(M(D_{Down})) = 1,69 \%; MRE(D(D_{Down})) = 3,9 \%.$$

Таким образом, сравнение математической и имитационной моделей показывает высокую степень их адекватности.

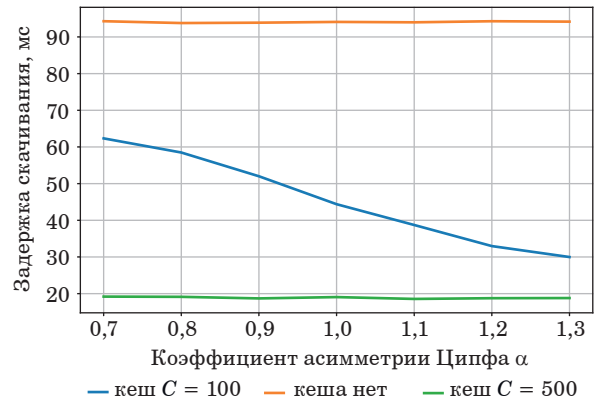
В следующем эксперименте (рис. 8) сначала удалим кеш с уровня Edge, чтобы проверить эффективность уменьшения задержек (все запросы идут на уровень Cloud). Потом добавим кеш с тем же размером, что и каталог  $M$  (500 элементов), чтобы все запросы удовлетворялись на уровне Edge. Эксперимент проведен с коэффициентом асимметрии  $\alpha$  от 0,7 до 1,3 с шагом 0,1.

Как известно, увеличение  $\alpha$  приводит к возрастанию коэффициента попадания в кеш LRU, из-за чего средняя задержка уменьшается. При  $\alpha > 1$  небольшая часть самых популярных объектов получает непропорционально большую



■ **Рис. 7.** Сравнение имитационной и математической моделей

■ **Fig. 7.** Comparison of simulation and mathematical models



■ **Рис. 8.** Задержка скачивания элементов контента из системы с кешем LRU

■ **Fig. 8.** Delay in downloading content elements from a system with an LRU cache

долю запросов и находится в кеше длительное время. Выигрыш (уменьшение задержки) при использовании кеша NDN здесь составляет от 32 мс при  $\alpha = 0,8$  до 65 мс при  $\alpha = 1,3$ .

Рассмотрим эксперимент по увеличению количества пользователей на уровне Users в системе. Пусть все пользователи отправляют запрос на скачивание файла размером  $S_{Data}$  и получают его по сети NDN. Тогда пропускная способность системы *throughput* может быть определена как количество байт, которое проходит через нее за единицу времени в целях запроса и получения данных:

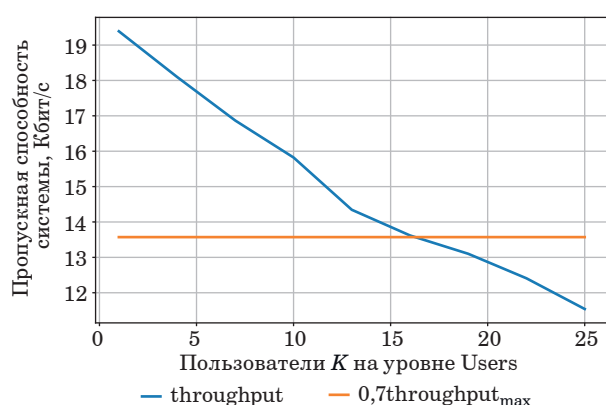
$$throughput = \frac{S_{Interest}N_{Interest} + S_{Data}N_{Data}}{T}, \quad (20)$$

где  $T$  – время проведения имитационного моделирования.

Пусть максимальная пропускная способность системы  $throughput_{max}$  достигается без конкуренции, при  $K = 1$  пользователь, и пусть система стабильно работает при значениях  $throughput > 0,7throughput_{max}$ . Рассчитаем данный показатель при увеличении количества пользователей  $K$  до 25 (рис. 9).

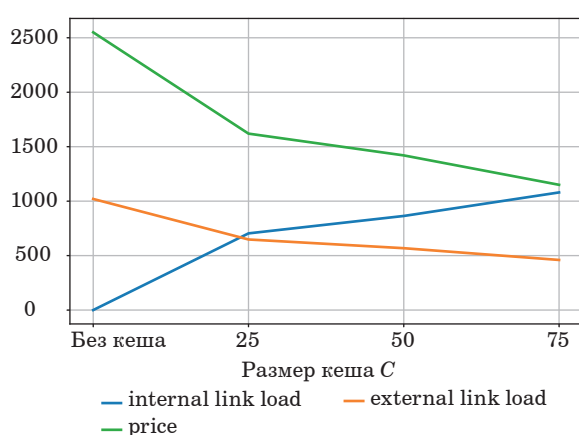
Таким образом, видим, что конкуренция пользователей за доступ к каналу выводит систему из стабильного состояния при  $K > 16$  пользователей. При этом задержка доступа к каналу в слоте растет пропорционально  $K$  и достигает более  $D_{ac} = KS_{Interest}/2R = 32$  мс, что также увеличивает среднюю задержку  $D_{Down}$  практически до 100 мс, по этой причине добавлять пользователей в систему также нет смысла.

Приведем эксперимент в так называемом режиме малого кеша (по отношению к размеру каталога), увеличивая  $C$  от состояния «без кеша» при  $C = 0$  до  $C = 75$ . Назовем показателем «нагрузка внутренних каналов» (*internal link load*)



■ **Рис. 9.** Исследование пропускной способности кеш-системы

■ **Fig. 9.** Research of cache system throughput



■ **Рис. 10.** Вычисление показателей internal link load, external link load и price

■ **Fig. 10.** Calculation of internal link load, external link load and price indicators

количество обращений к каналам до второго хопа, т. е. с уровня Users до уровня Edge и обратно [15]. Соответственно, показатель «нагрузка внешних каналов» (*external link load*) – это количество обращений к каналам, начиная со второго хопа, т. е. с уровня Edge на уровень Cloud и обратно. Пусть за обращение в облако провайдер платит цену  $B = 2,5$  у.е. Стоимость «промахов кеша» вследствие его неоптимальной работы будет соответственно равна  $Price = B \cdot external\ link\ load$  (рис. 10).

Таким образом, добавление даже небольшого кеша уменьшает показатель *external link load* и,

соответственно, издержки провайдеров (практически на 1500 у.е. по сравнению с издержками при отсутствии кеша, что обозначает уменьшение издержек до 60 %).

### Заключение

В данной работе изучено влияние кеширования на задержку получения контента в сетях NDN с учетом условия Non-ZDD. В отличие от существующих работ, на основе разработанных моделей подтверждено, что в сетях NDN выигрыш от кеширования по снижению задержки является количественно ограниченным и может быть предсказан. Кроме того, предложен метод, позволяющий количественно оценить издержки провайдера, администрирующего кеш.

Для различных сценариев задержка уменьшалась от 20 до 65 мс в зависимости от размера кеша и распределения популярности элементов. Математическая фазовая модель времени обслуживания на разных сегментах системы, представленная в виде диаграммы Кокса, позволила рассчитать математическое ожидание и дисперсию задержек для случаев попадания и промаха кеша. Значения задержек (18 мс при попадании в кеш и 95 мс при промахе кеша) при таком подходе согласуются с работами, где производились замеры на реальной сети с Edge- и Cloud-уровнем, что является подтверждением того, что предложенная модель адекватно отражает соотношение задержек в реальных сценариях.

В будущем задают направление для дальнейших исследований вопросы преодоления ограничений модели, расширения среды имитационного моделирования для исследования и анализа более сложных алгоритмов вытеснения кеша, например k-LRU [13] или S3-FIFO. Предстоящая работа может быть направлена также на переход к сегментно-ориентированной модели, где для полного скачивания файла необходимо получить несколько пакетов Data.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00299, <https://rscf.ru/project/24-19-00299/>

### Литература

1. Якименко С. И., Кучерявый Е. А. Кооперативное кеширование контента в NDN-сценариях для сетей VANET. *Электросвязь*, 2023, № 9, с. 9–17. doi:10.34832/ELSV.2023.46.9.002, EDN: HUNFMD

2. Amadeo M., Ruggeri G. Exploring in-network computing with information-centric networking: Review and research opportunities. *Future Internet*, 2025, vol. 17 (1), no. 42, pp. 1–28. doi:10.3390/fi17010042

3. Kovalchukov R., Glazkov R., Srikanteswara S., Zhang Y., Moltchanov D., Arrobo G., Feng H.,

- Spoczynski M., Himayat N. In-network dynamic compute orchestration over mobile edge systems. *Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, 2023, pp. 1–7. doi:10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200992
4. Pirmagomedov R., Srikanteswara S., Moltchanov D., Arrobo G., Zhang Y., Himayat N., Koucheryavy Y. Augmented computing at the edge using named data networking. *Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/GCWkshps50303.2020.9367585
  5. Vladyko A., Tambovtsev G., Podgornaya E., Cheloung S. A., Alkanhel R., Plotnikov P. Cluster-based vehicle-to-everything model with a shared cache. *Mathematics*, 2023, vol. 11(13), no. 3017, pp. 1–19. doi:10.3390/math11133017
  6. Kurose J. Information-centric networking: The evolution from circuits to packets to content. *Computer Networks*, 2014, vol. 66, pp. 112–120. doi:10.1016/j.comnet.2014.04.002
  7. Jacobson V., Smetters D. K., Thornton J. D., Plass M. F., Briggs N. H., Braynard R. L. Networking named content. *Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, 2009, pp. 1–12. doi:10.1145/1658939.1658941
  8. Zhang L., Afanasyev A., Burke J., Jacobson V., Claffy K. C., Crowley P., Papadopoulos C., Wang L., Zhang B. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, vol. 44, no. 3, pp. 66–73. doi:10.1145/2656877.2656887
  9. Бородин А. С., Рожков М. А., Киричек Р. В., Кучерявый А. Е. New IP от 5G к 6G: нужна ли смена парадигмы? *Электросвязь*, 2020, № 7, с. 15–21. doi:10.34832/ELSV.2020.8.7.002, EDN: CSEHIN
  10. Гребешков А. Ю., Боровская Я. А. Построение информационно-ориентированных сетей 5G-ICN. *Вестник связи*, 2021, № 11, с. 13–18. EDN: IDYVMD
  11. Hasslinger G., Ntougias K., Hasslinger F., Hohlfeld O. Analysis of the LRU cache startup phase and convergence time and error bounds on approximations by Fagin and Che. *IEEE 2022 20th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2022, pp. 254–261. doi:10.23919/wiopt56218.2022.9930556
  12. Fricker C., Robert P., Roberts J., Sbihi N. Impact of traffic mix on caching performance in a content-centric network. *Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM Workshops*, 2012, pp. 310–315. doi:10.1109/INFOCOMW.2012.6193511
  13. Garetto M., Leonardi E., Martina V. A unified approach to the performance analysis of caching systems. *ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems (TOMPECS)*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 1–28. doi:10.1145/2896380
  14. Amadeo M., Campolo C., Ruggeri G., Molinaro A. Beyond edge caching: Freshness and popularity aware IoT data caching via NDN at internet-scale. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 352–364. doi:10.1109/TGCN.2021.3124452
  15. Якименко С. Аспекты кэширования в информационно-ориентированных сетях. *Современные сетевые технологии (MONETEC-2022): тр. 4-й Междунар. конф.*, Москва, 27–29 октября 2022 г., М., с. 70–76. EDN: NUPDPT
  16. Блинников М. А., Пирмагомедов Р. Я., Молчанов Д. А., Кучерявый Е. А. Применение технологий именованных данных в беспроводных ячеистых сетях. *Электросвязь*, 2019, № 11, с. 22–28. EDN: RHQFJM
  17. Wibowo T. A., Syambas N. R., Hendrawan L. V., Yovita R. A. Closer towards named data networking implementation. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 265–276. doi:10.22266/ijies2023.0228.24
  18. Путевская И. В. Исследование эффективности стратегий кэширования данных в информационно-ориентированных сетях. *Вестник Чувашского университета*, 2024, № 4, с. 128–140. doi:10.47026/1810-1909-2024-4-128-140, EDN: SXLOVC
  19. Glazkov R., Moltchanov D., Srikanteswara S., Samuylov A., Arrobo G., Zhang Y., Feng H., Himayat N., Spoczynski M., Koucheryavy Y. Provisioning of fog computing over named-data networking in dynamic wireless mesh systems. *Sensors*, 2024, vol. 24 (4), no. 1120, pp. 1–24. doi:10.3390/s24041120
  20. Ali-Eldin A., Wang B., Shenoy P. The hidden cost of the edge: A performance comparison of edge and cloud latencies. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2021, pp. 1–12. doi:10.1145/3458817.3476142
  21. Kovacevic I., Harjula E., Glisic S., Lorenzo B., Ylianttila M. Cloud and edge computation offloading for latency limited services. *IEEE Access*, 2021, no. 9, pp. 55764–55776. doi:10.1109/access.2021.3071848
  22. Drolia U., Guo K., Tan J., Gandhi R., Narasimhan P. Cachier: Edge-caching for recognition applications. *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2017, pp. 276–286. doi:10.1109/icdcs.2017.94
  23. Bassoli R., Granelli F., Arzo S. T., Di Renzo M. Toward 5G cloud radio access network: An energy and latency perspective. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021, vol. 32, no. 1, pp. 1–16. doi:10.1002/ett.3669
  24. Rajalakshmi P., Tammana P. Optimizing latency for real-time traffic and road safety applications through MEC-based V2X system. *IEEE 2023 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, 2023, pp. 1–8. doi:10.1109/smartnets58706.2023.10215515
  25. Ioannou A., Weber S. A survey of caching policies and forwarding mechanisms in information-centric networking. *IEEE Communications Surveys & Tuto-*

rials, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 2847–2886. doi:10.1109/COMST.2016.2565541

- 26. Ahmadi M., Roberts J., Leonardi E., Movaghar A.** Poster: Impact of traffic characteristics on request aggregation in an NDN router. *Proceedings of the 2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, 2019, pp. 1–2. doi:10.13140/RG.2.2.30376.11528
- 27. Dehghan M., Jiang B., Dabirmoghaddam A., Towsley D.** On the analysis of caches with pending interest tables. *Proceedings of the 2nd ACM Conference on In-*

*formation-Centric Networking*, 2015, pp. 69–78. doi:10.1145/2810156.2810161

- 28. Wallace R., Andrade X. G., Kayser P., Luo Z., Mukherjee H., Nunes R., Warrior M.** Models of network delay. *Proceedings of the International Workshop on Statistical Modelling*, 2024, pp. 231–238. doi:10.1007/978-3-031-65723-8\_36
- 29. Iversen V. B.** *Telettraffice Engineering and Network Planning*. DTU Fotonik, 2015. 382 p.

UDC 004.77

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-36-48

EDN: TYQXCS

### Development of models for calculating content access delays with account taken of caching in NDN networks

S. I. Iakimenko<sup>a</sup>, Lecturer, Junior Researcher, orcid.org/0000-0002-0698-1298, syakimenko@hse.ru

<sup>a</sup>A. N. Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE), 34, Tallinskaya St., 123458, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** Caching reduces content access latency by bringing it closer to users and offloading the cloud layer of the network. Edge servers are used for this purpose, but the standard TCP/IP stack does not fully utilize caching capabilities. Therefore, it is necessary to consider a cache model using the Named Data Networking stack, which is more suited for this function. **Purpose:** To develop models for estimating content access latency, taking into account the specifics of caching at an intermediate node in NDN. **Results:** We propose a simulation model implementing the Least Recently Used caching algorithm based on discrete event modeling, as well as a mathematical model of delays in receiving content. These models allow for an adequate assessment of the latency on each segment from the user to the cloud and for the system as a whole. Additionally, they make it possible to calculate key cache performance characteristics: cache hit probability and load on external and internal channels. Edge server-based caching decreases content access latency to 65 ms and reduces operator costs for accessing the remote cloud to 60%. **Practical relevance:** The results of this study can be used by internet service providers and telecom operators to reduce backbone bandwidth congestion and improve subscriber quality of service when downloading popular content. **Discussion:** The study used a scenario with a large catalog and a Poisson flow of edge cache requests, which corresponds to a regime in which the probability of request aggregation in the Pending Interest Table is low. Studying the dynamic effect of aggregation on content access latency requires a more complex traffic model (e.g., an ON-OFF or shot-noise model), which is the subject of further research.

**Keywords** – caching, Least Recently Used, latency, non-zero download delay, edge caching, Named Data Networking, simulation modeling, cloud.

**For citation:** Iakimenko S. I. Development of models for calculating content access delays with account taken of caching in NDN networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-36-48, EDN: TYQXCS

#### Financial support

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-19-00299, <https://rscf.ru/project/24-19-00299/>

#### References

1. Yakimenko S. I., Koucheryavy Y. A. Cooperative caching of content in NDN scenarios for VANET. *Electrosvyaz*, 2023, no. 9, pp. 9–17 (In Russian). doi:10.34832/ELSV.2023.46.9.002, EDN: HUNFMD
2. Amadeo M., Ruggeri G. Exploring in-network computing with information-centric networking: Review and research opportunities. *Future Internet*, 2025, vol. 17 (1), no. 42, pp. 1–28. doi:10.3390/fi17010042
3. Kovalchukov R., Glazkov R., Srikanteswara S., Zhang Y., Moltchanov D., Arrobo G., Feng H., Spoczynski M., Himayat N. In-network dynamic compute orchestration over mobile edge systems. *Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, 2023, pp. 1–7. doi:10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200992
4. Pirmagomedov R., Srikanteswara S., Moltchanov D., Arrobo G., Zhang Y., Himayat N., Koucheryavy Y. Augmented computing at the edge using named data networking. *Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/GCWkshps50303.2020.9367585
5. Vladyko A., Tambovtsev G., Podgornaya E., Chelloug S. A., Alkanhel R., Plotnikov P. Cluster-based vehicle-to-everything model with a shared cache. *Mathematics*, 2023, vol. 11(13), no. 3017, pp. 1–19. doi:10.3390/math11133017
6. Kurose J. Information-centric networking: The evolution from circuits to packets to content. *Computer Networks*, 2014, vol. 66, pp. 112–120. doi:10.1016/j.comnet.2014.04.002
7. Jacobson V., Smetters D. K., Thornton J. D., Plass M. F., Briggs N. H., Braynard R. L. Networking named content. *Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, 2009, pp. 1–12. doi:10.1145/1658939.1658941
8. Zhang L., Afanasyev A., Burke J., Jacobson V., Claffy K. C., Crowley P., Papadopoulos C., Wang L., Zhang B. Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, vol. 44, no. 3, pp. 66–73. doi:10.1145/2656877.2656887
9. Borodin A. S., Rozhkov M. A., Kirichek R. V., Koucheryavy A. E. New IP, from 5G to 6G: Do we need a paradigm change? *Electrosvyaz*, 2020, no. 7, pp. 15–21 (In Russian). doi:10.34832/ELSV.2020.8.7.002, EDN: CSEHIN
10. Grebeshkov A. Y., Borovskaya Y. A. Constructing of information-oriented 5G-ICN networks. *Vestnik svyazi*, 2021, no. 11, pp. 13–18 (In Russian). EDN: IDYVMD
11. Hasslinger G., Ntougias K., Hasslinger F., Hohlfeld O. Analysis of the LRU cache startup phase and convergence time and error bounds on approximations by Fagin and Che. *IEEE 2022 20th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2022, pp. 254–261. doi:10.23919/wiopt56218.2022.9930556
12. Fricker C., Robert P., Roberts J., Sbihi N. Impact of traffic mix on caching performance in a content-centric network.

- Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM Workshops*, 2012, pp. 310–315. doi:10.1109/INFCOMW.2012.6193511
13. Garetto M., Leonardi E., Martina V. A unified approach to the performance analysis of caching systems. *ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems (TOMPECS)*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 1–28. doi:10.1145/2896380
  14. Amadeo M., Campolo C., Ruggeri G., Molinaro A. Beyond edge caching: Freshness and popularity aware IoT data caching via NDN at internet-scale. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 352–364. doi:10.1109/TGCN.2021.3124452
  15. Yakimenko S. Aspects of caching in information-oriented networks. *Trudy 4-j Mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye setevye tekhnologii (MONETEC-2022)"* [Proc. 4th Int. Conf. "Modern Network Technologies-2022 (MONETEC-2022)"]. Moscow, 2022, pp. 70–76 (In Russian). EDN: NUPDPT
  16. Blinnikov M. A., Pirmagomedov R. Ya., Moltchanov D. A., Koucheryavy A. E. Application of named-data technologies in wireless mesh networks. *Electrosvyaz*, 2019, no. 11, pp. 22–28 (In Russian). EDN: RHQFJM
  17. Wibowo T. A., Syambas N. R., Hendrawan L. V., Yovita R. A. Closer towards named data networking implementation. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 265–276. doi:10.22266/ijies2023.0228.24
  18. Putevskaya I. V. Studying efficiency of data caching strategies in information-centric networks. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 2024, no. 4, pp. 128–140. doi:10.47026/1810-1909-2024-4-128-140, EDN: SXLOVC
  19. Glazkov R., Moltchanov D., Srikanteswara S., Samuylov A., Arrobo G., Zhang Y., Feng H., Himayat N., Spoczynski M., Koucheryavy Y. Provisioning of fog computing over named-data networking in dynamic wireless mesh systems. *Sensors*, 2024, vol. 24 (4), no. 1120, pp. 1–24. doi:10.3390/s24041120
  20. Ali-Eldin A., Wang B., Shenoy P. The hidden cost of the edge: A performance comparison of edge and cloud latencies. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2021, pp. 1–12. doi:10.1145/3458817.3476142
  21. Kovacevic I., Harjula E., Glisic S., Lorenzo B., Ylianttila M. Cloud and edge computation offloading for latency limited services. *IEEE Access*, 2021, no. 9, pp. 55764–55776. doi:10.1109/access.2021.3071848
  22. Drolia U., Guo K., Tan J., Gandhi R., Narasimhan P. Cacher: Edge-caching for recognition applications. *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, 2017, pp. 276–286. doi:10.1109/icdcs.2017.94
  23. Bassoli R., Granelli F., Arzo S. T., Di Renzo M. Toward 5G cloud radio access network: An energy and latency perspective. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021, vol. 32, no. 1, pp. 1–16. doi:10.1002/ett.3669
  24. Rajalakshmi P., Tammana P. Optimizing latency for real-time traffic and road safety applications through MEC-based V2X system. *IEEE 2023 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, 2023, pp. 1–8. doi:10.1109/smartnets58706.2023.10215515
  25. Ioannou A., Weber S. A survey of caching policies and forwarding mechanisms in information-centric networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 2847–2886. doi:10.1109/COMST.2016.2565541
  26. Ahmadi M., Roberts J., Leonardi E., Movaghar A. Poster: Impact of traffic characteristics on request aggregation in an NDN router. *Proceedings of the 2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, 2019, pp. 1–2. doi:10.13140/RG.2.2.30376.11528
  27. Dehghan M., Jiang B., Dabirmoghaddam A., Towsley D. On the analysis of caches with pending interest tables. *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Information-Centric Networking*, 2015, pp. 69–78. doi:10.1145/2810156.2810161
  28. Wallace R., Andrade X. G., Kayser P., Luo Z., Mukherjee H., Nunes R., Warrior M. Models of network delay. *Proceedings of the International Workshop on Statistical Modelling*, 2024, pp. 231–238. doi:10.1007/978-3-031-65723-8\_36
  29. Iversen V. B. *Teletraffic Engineering and Network Planning*. DTU Fotonik, 2015. 382 p.



## Методика оценки функциональной безопасности маршрутизаторов на основе вероятностно-физической модели

С. Н. Полесский<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-8066-5162](https://orcid.org/0000-0002-8066-5162), [spolessky@hse.ru](mailto:spolessky@hse.ru)

С. Р. Тумковский<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-1647-2171](https://orcid.org/0000-0002-1647-2171), [stumkovskiy@hse.ru](mailto:stumkovskiy@hse.ru)

В. Э. Цветков<sup>а</sup>, аспирант, старший преподаватель, [orcid.org/0009-0004-3709-276X](https://orcid.org/0009-0004-3709-276X)

П. С. Королев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-5720-0498](https://orcid.org/0000-0002-5720-0498)

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Таллинская ул., 34, Москва, 123458, РФ

**Введение:** функциональная безопасность сетевых маршрутизаторов, используемых в критической информационной инфраструктуре, требует количественной оценки на основе надежных данных. Существующие методики оценки показателей безопасности не отражают влияние физических механизмов деградации в реальных условиях эксплуатации, что снижает достоверность результатов и затрудняет принятие обоснованных технических решений. **Цель:** повысить точность количественной оценки функциональной безопасности маршрутизаторов путем разработки методики, учитывающей деградационные процессы и параметры состояния оборудования в условиях эксплуатации. **Результаты:** проведена верификация пяти подходов к оценке надежности: поэтапного анализа на базе экспоненциального распределения, анализа статистики отказов, оценки на основе определяющих параметров состояния, метода Вейбайеса и смешанной модели пропорциональных рисков. Сравнительный анализ показал, что классические однопараметрические модели дают относительную погрешность от 29 до 48 %, игнорируя физические механизмы деградации. На основе смешанной модели пропорциональных рисков с распределением Вейбулла разработана методика уточненной оценки показателей функциональной безопасности, обеспечивающая минимальную погрешность на уровне 4,2 % при оценке средней наработки до отказа. Экспериментальная апробация проведена на маршрутизаторе Keenetic Starter с использованием ускоренных испытаний и мониторинга диагностических параметров (температуры, загрузки процессора, использования памяти). Вероятностно-физический подход, основанный на контроле ключевых параметров состояния, позволяет скорректировать оценку средней наработки и рассчитать среднюю частоту опасного отказа. **Практическая значимость:** повышение точности оценки показателей надежности и уровня полноты безопасности, снижение совокупных затрат на обеспечение функциональной безопасности сетевых маршрутизаторов в составе критической информационной инфраструктуры, а также повышение обоснованности технических решений при проектировании защищенных сетевых систем.

**Ключевые слова** — функциональная безопасность критической инфраструктуры, уровень полноты безопасности, функция плотности вероятности, маршрутизатор, средняя наработка до отказа.

**Для цитирования:** Полесский С. Н., Тумковский С. Р., Цветков В. Э., Королев П. С. Методика оценки функциональной безопасности маршрутизаторов на основе вероятностно-физической модели. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 49–60. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

**For citation:** Poleskiy S. N., Tumkovskiy S. N., Tsvetkov V. E., Korolev P. S. Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 49–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

### Введение

Сетевые маршрутизаторы на протяжении длительного времени занимают важное место в составе критически значимой информационной инфраструктуры (КИИ), широко применяемой в различных отраслях. В настоящее время обеспечение безопасности таких объектов регулируется рядом нормативных документов, в числе которых:

- приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239;
- постановление Правительства РФ от 08.02.2018 № 127;
- национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 61508-1–2012 [1].

Стандарт представляет собой фундаментальный документ в области функциональной

безопасности, регламентирующий требования к жизненному циклу электрических, электронных и программно-управляемых систем, предназначенных для обеспечения защиты жизни, здоровья людей и охраны окружающей среды. Несмотря на то, что данный стандарт разрабатывался преимущественно для промышленных и технологических систем с повышенными требованиями к безопасности, его методологические положения обладают универсальным характером и могут быть адаптированы для решения задач анализа функциональной безопасности компонентов КИИ. Применение положений ГОСТ Р МЭК 61508-1–2012 обеспечивает системный подход к оценке рисков и идентификации опасных отказов [2]. Стандарт также регламентирует

разработку и верификацию мер для достижения требуемого уровня полноты безопасности.

Одним из основных количественных показателей при проведении такой оценки выступает уровень полноты безопасности (УПБ). Однако применимость существующих методических указаний ограничена в условиях переменной интенсивности отказов, характерной для многих объектов КИИ. Ориентация исключительно на один тип отказа способна исказить результат, что влечет за собой риск недоступности системы вследствие отказа наименее надежного элемента [3].

Невозможно провести корректную оценку функциональной безопасности без объективных данных о параметрах надежности, в частности безотказности оборудования. При этом заниженные прогнозные значения УПБ, полученные на основе упрощенных допущений, часто приводят к излишним мерам обеспечения надежности, таким как избыточное резервирование, что увеличивает структурную сложность системы, ее стоимость и снижает общую эксплуатационную эффективность.

Таким образом, отсутствие целесообразных, адаптированных под реальные условия эксплуатации количественных методик оценки функциональной безопасности сетевых маршрутизаторов затрудняет принятие обоснованных технических решений. Это влечет нерациональное расходование ресурсов и повышает риски нарушения устойчивости функционирования КИИ. Многочисленные уязвимости могут вызывать отказы устройств и повышать угрозу недоступности КИИ. В связи с этим целью настоящей работы является разработка подхода к повышению точности оценки УПБ маршрутизаторов с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации. Необходимость исследования обусловлена тем, что существующие методики не отражают специфику деградационных процессов в реальных условиях, что существенно снижает достоверность оценки и практическую применимость выводов.

## Обзор предметной области

Функциональная безопасность является неотъемлемой частью общей безопасности технических систем и тесно связана с их надежностью. Эта взаимосвязь особенно важна для областей, где предъявляются повышенные требования к обеспечению безотказной и устойчивой работы в условиях возможных отказов отдельных элементов или подсистем. Реализация функциональной безопасности направлена на снижение рисков, связанных с отказами, и достигается за

счет проектирования архитектуры, обеспечивающей предотвращение и контроль опасных состояний [4].

Одним из примеров тесной связи между функциональной безопасностью и надежностью служит метод расчета вероятности опасного отказа в час (Probability of Failure per Hour, PFH), основанный на использовании средней наработки до отказа (Mean Time to Failure, MTTF). Данный подход подчеркивает, что корректное количественное определение параметров надежности непосредственно влияет на точность оценки уровня функциональной безопасности.

Таким образом, надежность компонентов системы выступает одним из базовых факторов, определяющих уровень ее функциональной безопасности. Более надежные элементы снижают вероятность возникновения опасных отказов, тем самым повышая соответствие системы требованиям конкретного уровня полноты безопасности.

Согласно положениям теории надежности, отказы технических систем условно подразделяются на три основные категории: производственные, связанные с дефектами, возникающими на этапе изготовления; внезапные, происходящие без предварительных признаков; постепенные, развивающиеся в результате накопления деградационных процессов [5]. Такая классификация отражает различия в степени предсказуемости момента наступления отказа.

Внезапные отказы характеризуются отсутствием предварительных диагностируемых признаков и, как правило, проявляются в виде мгновенной утраты работоспособности отдельного компонента или всей системы. Выявление таких отказов с использованием стандартных методов технического контроля затруднено или практически невозможно.

Постепенные отказы характеризуются монотонным отклонением эксплуатационных параметров от номинальных значений, что создает возможность для их раннего обнаружения посредством диагностических методов и применения прогнозных моделей. Однако развитие методов анализа технического состояния выявляет ограниченность жесткого деления отказов на внезапные и постепенные. Современные исследования указывают на условность этой границы, вызванную в первую очередь уровнем доступных диагностических средств.

Многие отказы считаются внезапными исключительно по причине отсутствия возможности мониторинга параметров, предшествующих их возникновению. Расширение спектра контролируемых характеристик и совершенствование мониторинга позволяют пересматривать данную классификацию в пользу более гибкого подхода,

основанного на реальной наблюдаемости процессов деградации.

Время наработки до отказа представляет собой случайную величину и описывается с использованием вероятностных распределений. От корректности выбора модели распределения зависит точность оценки надежности, поскольку различные модели могут давать существенно отличающиеся результаты. Современная теория надежности базируется на вероятностной парадигме, где отказы трактуются как случайные события, а система рассматривается в бинарной логике: работоспособна или нет. Хотя подобные подходы обладают строгим математическим обоснованием, на практике они зачастую не отражают физическую сущность отказов и игнорируют реальные условия эксплуатации конкретных компонентов. Это может приводить к снижению точности и надежности получаемых оценок.

В процессе оценки надежности технических систем применяются как однопараметрические, так и двухпараметрические вероятностные модели. Каждая из них имеет ограниченную сферу применения и используется с учетом особенностей отказных процессов и доступной информации [6].

К однопараметрическим распределениям относятся:

- экспоненциальное распределение;
- нормальное распределение;
- логнормальное распределение.

Двухпараметрическими распределениями являются:

- альфа-распределение;
- распределение Вейбулла;
- диффузионное немонотонное/монотонное распределение.

В инженерной практике преобладают экспоненциальная и вейбулловская модели. Последняя лучше отражает реальные данные, но требует большего объема выборки и вычислительных ресурсов. При анализе надежности уникальных или высоконадежных изделий классические статистические методы ограничены из-за дефицита достоверной информации об отказах. Кроме того, представление отказов как исключительно случайных событий затрудняет установление связи между показателями надежности и физическими механизмами деградации. Это предопределяет необходимость применения интегративных подходов, объединяющих вероятностное моделирование с анализом физической природы отказов и механизмов деградации.

Классификация методов оценки надежности определяется характером исходной информации об объекте и этапом его жизненного цикла. Методы оценки надежности классифицируются на априорные, апостериорные и комбинирован-

ные. Априорные методы основаны на теоретическом моделировании отказов и применяются преимущественно на стадии проектирования при отсутствии эксплуатационных данных. Апостериорные методы используют эмпирические данные, полученные в ходе эксплуатации, испытаний или мониторинга. Комбинированные методы объединяют теоретическое моделирование с результатами наблюдений, обеспечивая баланс между расчетной обоснованностью и практической достоверностью на разных этапах жизненного цикла системы.

Современное направление в области надежности связано с разработкой методов, интегрирующих физико-механические модели процессов деградации с вероятностными оценками. Комплексный подход обеспечивает адаптивность оценки надежности, позволяя учитывать реальные эксплуатационные условия даже при ограниченной статистике, что особенно важно на разных этапах жизненного цикла оборудования.

Для оценки параметров распределений, описывающих надежность технических систем на основе экспериментальных данных, наиболее обоснованным и широко применяемым считается метод максимального правдоподобия [7]. Этот подход позволяет получить статистически устойчивые и асимптотически несмещенные оценки с минимальной дисперсией. Метод эффективно использует информацию, содержащуюся в выборке, и особенно подходит для задач, где доступен достаточный массив наблюдений и реализуемы численные алгоритмы оптимизации.

В тех случаях, когда вычислительные ресурсы ограничены или необходимы приближенные расчеты, в инженерной практике используется моментный метод. Его суть заключается в приравнивании эмпирических моментов распределения к соответствующим теоретическим моментам [8]. Несмотря на меньшую точность по сравнению с методом максимального правдоподобия, при выборках свыше 100 наблюдений расхождение в результатах, как правило, не оказывают существенного влияния на итоговую надежность оценку.

Вероятностно-физический подход [9] представляет собой современную методологию анализа надежности, в которой технический объект рассматривается не как статическая система, а как динамически изменяющаяся структура, подверженная постепенному накоплению повреждений. В этой концепции отказ рассматривается не как внезапное событие, а как закономерный исход длительного воздействия физических и химических факторов. Ключевая идея заключается в том, что каждый элемент системы со временем претерпевает деградационные изменения, например, в результате износа, уста-

лостных процессов, коррозионного разрушения или диффузии.

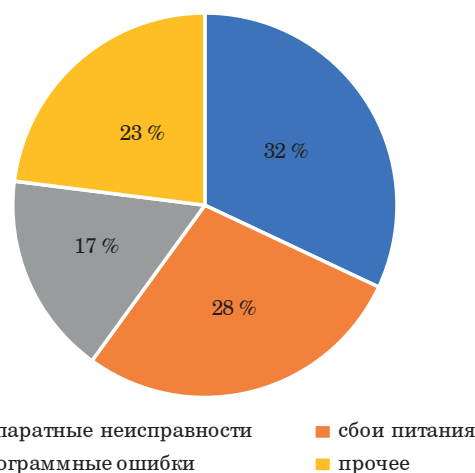
Принципиальное отличие вероятностно-физических моделей от чисто вероятностных заключается в наличии физически осмысленных параметров, отражающих реальные механизмы старения и разрушения компонентов. Это обеспечивает более глубокую интерпретацию результатов и позволяет повысить точность оценки надежности за счет учета индивидуальных особенностей функционирования изделия. При наличии измеряемого параметра, характеризующего ресурс или состояние элемента (например, температуры, сопротивления, выходной мощности), и возможности его мониторинга становится доступной реализация прогностического подхода к оценке надежности [10]. В этом случае двухпараметрические вероятностно-физические модели позволяют адаптировать надежностный анализ к конкретным условиям эксплуатации, что особенно актуально для критически важных систем с нестандартными режимами работы.

Таким образом, вероятностно-физический подход обеспечивает как теоретическую обоснованность, так и практическую применимость методов оценки надежности в условиях ограниченной статистической информации, позволяя осуществлять индивидуализированное прогнозирование ресурса.

Маршрутизаторы являются ключевым элементом в составе КИИ, обеспечивая функционирование большинства сетевых сервисов и каналов связи. Около 82 % сетевых устройств в их инфраструктуре составляют именно маршрутизаторы. Несмотря на сравнительно высокую надежность — при среднегодовой вероятности отказа менее 5 % — масштаб их распространения делает данный класс оборудования одним из основных источников сбоев, способных повлиять на устойчивость и доступность сетевых систем. Основными источниками отказов при этом выступают аппаратные неисправности, нестабильность электропитания, а также программные сбои. Соотношение указанных факторов представлено на рис. 1.

Сходные закономерности фиксируются и в инфраструктуре других ведущих технологических компаний. По статистике, порядка 3 % маршрутизаторов, используемых компанией Microsoft в дата-центрах, выходят из строя в течение первых 80 дней эксплуатации.

Проведенный анализ позволяет заключить, что по мере усложнения архитектуры маршрутизаторов и внедрения новых технологических решений возрастает число потенциальных уязвимостей. Многие из них могут приводить к отказу устройств, что в свою очередь создает угрозу недоступности КИИ.



■ **Рис. 1.** Статистический анализ отказов сетевых маршрутизаторов Microsoft

■ **Fig. 1.** Statistical analysis of Microsoft network router failures

### Подготовка исходных данных

Для выполнения надежностного анализа программно-аппаратных систем требуется заранее сформировать достоверную и репрезентативную базу данных. Это обеспечивается тщательным планированием объема, условий и порядка проведения испытаний для получения информации, необходимой для обоснованных оценок надежности и функциональной безопасности. Основной задачей на данном этапе является получение объективных параметров, позволяющих количественно оценить среднюю наработку до отказа. В качестве основы анализа используются данные, отражающие моменты отказов, текущее состояние устройства и признаки развития деградационных процессов.

При наличии доступа к исследуемому устройству рациональным является проведение ускоренных испытаний, направленных на искусственное интенсифицирование отказных процессов. Такой подход позволяет в ограниченные сроки получить статистически значимые данные, а также выявить тренды изменения параметров, предшествующих наступлению отказа.

Ускоренные испытания предполагают создание условий, при которых внешние воздействия усиливаются для сокращения времени до наступления отказа, сохраняя при этом достоверность получаемых данных [11]. В зависимости от цели исследования применяются различные режимы: штатный (нормальный), с усиленными нагрузками (форсированный) либо их комбинации (комбинированный), позволяющие воспроизвести более сложные сценарии эксплуатации и ускорить проявление деградационных эффектов [12].

Форсированные режимы особенно эффективны для высоконадежных устройств, таких как маршрутизаторы, где при нормальных условиях отказов мало и длительность традиционных испытаний сопоставима со сроком службы устройства.

Предметом исследования выбран маршрутизатор Keenetic Starter – представитель массового класса сетевых устройств, применяемых в домашних и малых корпоративных сетях.

Согласно литературным источникам, МТТФ подобных устройств составляет от 20 000 до 30 000 часов [13]. В рамках текущей работы для целей моделирования и последующей проверки результатов расчетов принято усредненное ориентировочное значение  $MTTF = 30\ 000$  ч.

Для получения достаточного объема информации в разумные сроки было решено провести ускоренные определяющие испытания с форсированным воздействием. Такой подход позволяет целенаправленно ускорить развитие отказов, что критически важно для выявления закономерностей деградации и построения статистически обоснованных надежностных моделей.

Для имитации условий эксплуатации маршрутизатора при высоких нагрузках были задействованы программные инструменты iperf3 и hping3, представляющие собой надежные средства нагрузочного тестирования телекоммуникационного оборудования. Благодаря их совместному применению воспроизведены разнообразные сценарии сетевой активности, максимально приближенные к реальной рабочей среде.

Такой подход обеспечил комплексную оценку надежности устройства при воздействии различных типов трафика, включая интенсивную передачу данных, имитацию атак на сетевой уровень и обращение с фрагментированными пакетами. Это позволило объективно проанализировать устойчивость маршрутизатора к нагрузочным

воздействиям. Результаты, зафиксированные в процессе экспериментальных испытаний, представлены в табл. 1.

В ходе испытаний с периодичностью наблюдений один день регистрировались значения скорости передачи данных, характеризующие текущую нагрузку и производительность устройства. Результаты измерений зафиксированы:

- скорость передачи – [75,0; 74,93; 74,83; 74,75; 74,69; 74,64; 74,55; 74,45] Мбит/с;
- приращение  $\Delta Z$  – [0,07; 0,1; 0,08; 0,06; 0,05; 0,09; 0,1];
- начальное значение  $\Pi_0$  – 75 Мбит/с;
- предельное значение  $\Pi$  – 5 Мбит/с.

### Анализ методик оценки надежности

Анализ надежности маршрутизатора Keenetic Starter с применением экспоненциального закона распределения времени безотказной работы начинается с построения структурной модели устройства, включающей выделение ключевых функциональных элементов, определяющих его работоспособность. Расчет средней наработки до отказа для устройства в целом осуществляется на основе ориентировочных значений надежности каждого элемента.

В качестве исходных данных использованы справочные значения МТТФ, приведенные в нормативных справочниках по надежности MIL-HDBK-217 и HDBK-217Plus, соответствующие типовым условиям эксплуатации электронных устройств:

- ОЗУ, флеш-память, ЦПУ – 60 000 ч;
- блок питания, антенны Wi-Fi – 60 000 ч;
- порты Ethernet – 90 000 ч.

Средняя наработка до отказа устройства при поэлементном анализе рассчитывается как величина, обратная сумме обратных значений средней наработки до отказа компонентов. При этом учитывается общее количество элементов  $n$ , входящих в состав устройства [14]:

$$MTTF = \sum_i^n \frac{1}{MTTF_i} \quad (1)$$

На основе поэлементного анализа и ориентировочных данных, представленных выше, рассчитанное значение  $MTTF = 20\ 225$  ч.

Каждый отказ устройства может быть соотнесен с определенным механизмом деградации, обусловленным физико-химическими или конструктивными факторами. В этом контексте распределение отказов представляется в виде совокупности подмножеств, каждое из которых характеризуется долей отказов  $p_j$ , приходящейся на соответствующий механизм отказа.

■ **Таблица 1.** Анализ отказов и результатов мониторинга маршрутизатора Keenetic Starter

■ **Table 1.** Analysis of failures and monitoring results of the Keenetic Starter router

Вид отказа	Ресурс, ч	ОЗУ, Мбайт	ЦПУ, %	Температура, °С
Программные сбои	32 900	34,6	86	58
Программные сбои	22 500	32,7	87	59
Программные сбои	20 400	34,2	88	62
Тепловая перегрузка	29 600	27,5	45	67
Тепловая перегрузка	23 500	26,3	55	65

Для исследуемого маршрутизатора выполнена количественная оценка вклада различных механизмов деградации. Полученные значения представлены в табл. 2.

Значение обобщенного коэффициента вариации  $v$  вычисляется из выражения

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^m p_i^2}}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество рассматриваемых процессов деградации;  $v_i$  – коэффициент вариации, соответствующий  $i$ -му механизму отказа;  $p_i$  – доля отказов, обусловленная  $i$ -м процессом деградации.

Подставив значения из табл. 2 в формулу (2), получим результирующее значение обобщенного коэффициента вариации  $v = 0,8$ .

Для дальнейшего анализа используется функция эмпирического распределения  $F_j$ , значения которой сопоставляются с соответствующими квантилями нормированного нормального распределения  $U_{F_j}$ , определяемыми как

■ **Таблица 2.** Классификация видов отказов маршрутизатора Keenetic Starter

■ **Table 2.** Classification of failure types of the Keenetic Starter router

Тип отказа	Доля отказов $p_j$	Коэффициент вариации $v$
Механический износ портов	0,10	0,40
Тепловая перегрузка	0,08	0,18
Деградация памяти	0,07	0,50
Повреждение пайки	0,07	0,70
Нестабильность питания	0,18	0,30
Сбои цепей питания	0,10	0,50
Программные сбои	0,17	0,22
Прочие причины	0,23	0,8

■ **Таблица 3.** Расчетные значения квантилей нормального распределения уровня  $F_j$

■ **Table 3.** Calculated values of the quantiles of the normal distribution of level  $F_j$

Параметр	Значения квантилей при числе отказов $n$				
	1	2	3	4	5
$t_j$	20 400	22 500	23 500	29 600	32 900
$F_j$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{F_j}$	0,312	0,412	0,522	0,634	0,763

аргументы функции стандартного нормального распределения для уровня  $F_j$ . Соответствующие значения ресурса  $t_j$ , эмпирической функции  $F_j$  и квантилей  $U_{F_j}$  приведены в табл. 3.

Средняя наработка до отказа в данном виде анализа вычисляется по выражению

$$MTTF = \frac{1}{m} \left( \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{U_{F_j}} \right). \quad (3)$$

На основе значений из табл. 3  $MTTF = 50\,972$  ч.

Для оценки текущего технического состояния компонентов маршрутизатора целесообразно использовать диагностический параметр, обладающий высокой чувствительностью к изменениям, связанным с процессами деградации. Такой параметр может выступать в роли индикатора надежности, обеспечивая возможность прогнозирования отказа до его фактического наступления.

Средняя скорость изменения этого параметра  $a$  вычисляется на основе числа наблюдаемых приращений  $m$ , шага измерений по времени  $\Delta t$  и приращений параметра деградации между соседними измерениями  $\Delta Z_i$ :

$$a = \frac{1}{m \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^m \Delta Z_i. \quad (4)$$

Выражение для расчета коэффициента вариации имеет вид

$$v = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left( \Delta Z_i - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta Z_j \right)^2 \right]^{1/2} \times \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta Z_i \right)^{-1}. \quad (5)$$

На основе определенных значений  $a$  и  $v$  можно количественно описать надежность элемента, что дает возможность прогнозировать наступление отказа и заблаговременно завершать эксплуатацию устройства, минимизируя вероятность внезапного отказа и сопутствующих потерь. Средняя наработка до отказа рассчитывается по выражению

$$MTTF = \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) \frac{P_0 - P}{a}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае  $MTTF$  составляет 22 042 ч.

Для получения более достоверной оценки надежности маршрутизатора следует учитывать воздействие основных факторов эксплуатации, включая температурные условия, уровень загрузки

процессора и активность использования оперативной памяти [15]. Пренебрежение этими аспектами может привести к недостоверной или заниженной характеристике надежности устройства.

При анализе надежности технических систем важно учитывать влияние множества факторов, определяющих различные механизмы отказа [16]. В таких условиях функция плотности вероятности отказа может быть представлена в виде суммарной модели, объединяющей вклады отдельных механизмов. Модель включает число типов отказов  $p$ , коэффициенты  $\lambda_g$ , отражающие долю отказов, связанных с механизмом  $g$ , а также функцию плотности вероятности отказа  $f_g(t, z_t)$ , зависящую от времени  $t$  и состояния системы  $z_t$ :

$$f(t, z_t) = \sum_{g=1}^p \lambda_g f_g(t, z_t). \quad (7)$$

Функция  $f_g(t, z_t)$  определяется как произведение функции интенсивности отказов  $h_g(t, z_t)$  и функции надежности  $R_g(t, z_t)$ :

$$f_g(t, z_t) = h_g(t, z_t) \cdot R_g(t, z_t). \quad (8)$$

Связь между функцией интенсивности отказов и функцией надежности описывается экспоненциальным выражением, содержащим интеграл от функции интенсивности отказов:

$$R_g(t, z_t) = \exp\left[-\int_0^t h_g(t, z_t) dt\right]. \quad (9)$$

Для распределения Вейбулла функция интенсивности отказов включает параметр формы  $\beta_g$ , который определяет характер изменения интенсивности, параметр масштаба  $\eta_g$ , связанный с характерным временем отказа, а также вектор коэффициентов чувствительности  $\gamma$ , отражающий влияние параметров мониторинга:

$$h_g(t, z_t) = \frac{\beta_g}{\eta_g} \left(\frac{t}{\eta_g}\right)^{\beta_g-1} \exp(\gamma \cdot z_t). \quad (10)$$

Идентификация параметров функции плотности вероятности отказов требует данных о времени наступления отказов и значений ключевых параметров устройства на фиксированных моментах времени [17–19]. Методом максимального правдоподобия в сочетании с алгоритмом оптимизации Нелдера – Мида [20]

$$L(\beta, \eta, \gamma, \lambda) = \prod_{g=1}^p \left( \prod_{i=1}^{n_g} \lambda_g f_g(t_i, z_t) \prod_{s=1}^{m_g} \lambda_g R_g(t_s, z_t) \right) \quad (11)$$

могут быть получены оптимальные оценки параметров модели:  $\beta_1 - 4,36$ ;  $\eta_1 - 3000$ ;  $\beta_2 - 2,86$ ;  $\eta_2 - 3000$ ;  $\lambda - 0,60$ ;  $\gamma_1 - -10,00$ ;  $\gamma_2 - -8,02$ ;  $\gamma_3 - -2,90$ .

Кривые плотности распределения Вейбулла, соответствующие различным типам отказов (рис. 2), отражают характерные различия во временных параметрах процессов деградации.

Средняя наработка до отказа определяется как интеграл от произведения времени на функцию плотности распределения времени до отказа  $f(t)$ :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (12)$$

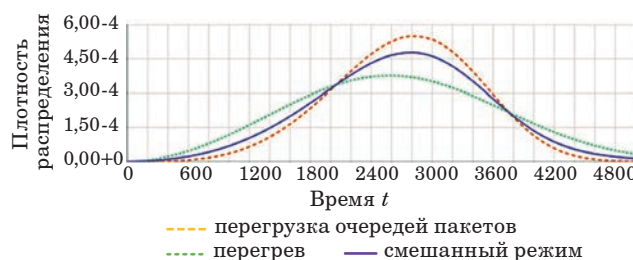
На основе расчета по данному выражению значение MTTF составляет 28 790 ч.

Анализ Вейбайеса представляет собой частный случай оценки параметров распределения Вейбулла, при котором параметр формы  $\beta$  задается заранее, а наличие по крайней мере одного отказа в выборке считается заведомо неизбежным [21]. Этот подход применяется в условиях ограниченного объема данных, в частности при малых или нулевых выборках отказов.

Для корректного применения метода предполагается выполнение трех условий: известно значение параметра формы  $\beta$  для рассматриваемого вида отказа; зафиксировано количество зарегистрированных отказов; в выборке обязательно произойдет как минимум один отказ.

При соблюдении указанных предпосылок параметр масштаба  $\eta$  вычисляется методом максимального правдоподобия с использованием следующего выражения. В формуле используются заданный параметр формы  $\beta$ , времена отказов  $t_i$  для  $i$ -го экземпляра и общее количество отказов  $NF$ :

$$\eta = \left( \frac{\sum_{i=1}^m t_i^\beta}{NF} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (13)$$



■ **Рис. 2.** Кривые плотности распределения Вейбулла  
 ■ **Fig. 2.** Weibull distribution density curves

При заданном значении параметра формы  $\beta = 2$  и на основании выражения (13) получено значение параметра масштаба  $\eta = 26\,203$ .

Средняя наработка до отказа для распределения Вейбулла при известных параметрах формы и масштаба рассчитывается по формуле

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right). \quad (14)$$

На основании проведенных расчетов получено значение  $MTTF = 23\,222$  ч.

Анализ Вейбайеса, как правило, уступает по точности классическому анализу Вейбулла, однако применяется при ограниченности исходных данных.

### Разработка методики оценки функциональной безопасности

Значения средней наработки до отказа маршрутизатора Keenetic Starter (табл. 4) рассчитаны с применением различных методов, рассмотренных в настоящем исследовании. В качестве эталона используется значение  $MTTF = 30\,000$  ч.

Результаты вычислений относительной погрешности показали, что оценка средней наработки до отказа, выполненная с использованием смешанной модели пропорциональных рисков, характеризуется минимальным отклонением и наибольшим соответствием эталонному значению.

Средняя частота опасного отказа в час

$$PFH = \frac{1}{MTTF}. \quad (15)$$

- **Таблица 4.** Средняя наработка до отказа
- **Table 4.** Mean time to failure

Метод	MTTF, ч	Относительная погрешность, %
Поэлементный анализ (распределение экспоненциальное)	20 225	48,33
Анализ на основе статистики отказов	50 972	41,1
Анализ на основе статистических характеристик процессов деградации	22 042	36,1
Анализ Вейбайеса	23 222	29,2
Анализ на основе смешанной модели пропорциональных рисков	28 790	4,2

Сопоставление рассчитанного значения  $PFH = 3,47 \times 10^{-5}$  1/ч для маршрутизатора Keenetic Starter с установленными в ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 диапазонами для уровней полноты безопасности показало, что полученное значение не соответствует ни одному из допустимых уровней УПБ. Этот результат указывает на непригодность использования данного устройства в составе КИИ. Эксплуатация оборудования с подобными показателями надежности может привести к сбоям в функционировании автоматизированных систем управления, нарушениям технологических процессов, потере контроля над объектами, а также созданию рисков для информационной безопасности.

Разработанная методика оценки функциональной безопасности основана на последовательном выполнении четырех основных этапов.

Структура методики представлена на рис. 3 в виде IDEF0-диаграммы.

На первом этапе (блок А1) проводятся испытания исследуемого объекта с регистрацией времени отказов, мониторингом ключевых параметров устройства и классификацией каждого отказа по типу с использованием анализа FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

Второй этап (блок А2) включает расчет параметров функций плотности вероятности отказов по выражениям (7)–(11) и вычисление  $MTTF$  по формуле (12).

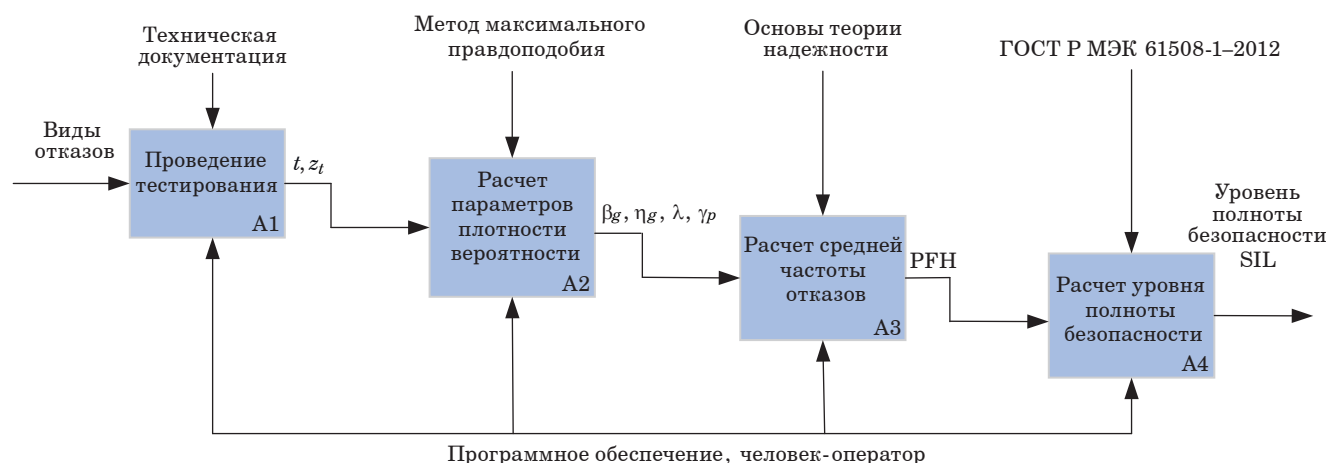
На третьем этапе (блок А3) выполняется определение средней частоты опасного отказа  $PFH$  согласно формуле (15).

Заключительный этап (блок А4) предусматривает вычисление уровня полноты безопасности на основе полученного значения  $PFH$  в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012.

При отсутствии возможности собрать полный набор входных данных для расчетов рекомендуется использовать метод Вейбайеса [формулы (13), (14)] в качестве альтернативного подхода для приближенной оценки средней наработки до отказа, что позволяет заменить выполнение блоков А1–А2.

### Оценка экономического эффекта предлагаемой методики

Для подтверждения эффективности разработанной методики была проведена оценка ее экономического эффекта. Экономический эффект определяется как разность суммарных ожидаемых затрат при использовании классических моделей надежности и предложенной вероятностно-физической методики. Совокупные затраты  $C_{total}$  могут быть представлены выражением



■ **Рис. 3.** Методика оценки функциональной безопасности [22]  
 ■ **Fig. 3.** Methodology for assessing functional safety [22]

$$C_{total} = C_{res} + C_{risk}, \quad (16)$$

где  $C_{res}$  — затраты на резервирование оборудования;  $C_{risk}$  — ожидаемый экономический ущерб от опасных отказов:

$$C_{risk} = PFH \cdot T \cdot C_{fail}. \quad (17)$$

Здесь  $T$  — период эксплуатации;  $C_{fail}$  — ущерб от одного отказа, связанный с простоем сети и восстановлением работоспособности.

На основании выражений (16), (17) можно рассмотреть правдоподобный сценарий эксплуатации маршрутизатора в составе КИИ. Например, при стоимости простоя сети 150 тыс. руб./ч и среднем времени восстановления 2 ч ущерб от одного отказа  $C_{fail} = 300$  тыс. руб. В качестве периода эксплуатации взято значение  $T = 43\,800$  ч.

Согласно табл. 4 для классической математической модели, основанной на экспоненциальном распределении (MTTF = 20 225 ч), ожидаемый ущерб  $C_{risk1}$  составляет 649,69 тыс. руб.

Более того, высокая неопределенность оценки приводит к необходимости резервирования устройства, что требует около 100 тыс. руб. дополнительных затрат. В этом случае совокупные затраты  $C_{total1} = 749,69$  тыс. руб.

В случае же предложенной методики, разработанной на основе анализа смешанной модели пропорциональных рисков, согласно табл. 4 (MTTF = 28 790 ч) ожидаемый ущерб  $C_{risk2} = 456,41$  тыс. руб.

Повышенная точность оценки позволяет отказаться от избыточного резервирования, и тогда суммарные затраты определяются только ожидаемым риском отказа, т. е.  $C_{total2} = C_{risk2} = 456,41$  тыс. руб.

Тогда экономический эффект применения предложенной методики  $\Delta C = C_{total1} - C_{total2} = 293,28$  тыс. руб.

Данное значение соответствует снижению совокупных затрат разработанной методики оценки примерно на 39 %.

### Заключение

Экспоненциальное распределение, предполагающее постоянную интенсивность отказов, игнорирует процессы старения и накопления повреждений, что существенно ограничивает применимость данной модели при оценке надежности. Пренебрежение деградиационными процессами может привести к ошибочным инженерным решениям, поскольку в расчетах не учитывается необходимость использования надежных материалов или выполнения профилактических мероприятий.

Для более точной оценки надежности необходимо учитывать физические характеристики компонентов. Проведенное исследование показало, что наилучшие результаты достигаются при использовании смешанной модели пропорциональных рисков, учитывающей как статистику отказов, так и значения диагностических параметров.

Ключевыми преимуществами разработанной методики оценки функциональной безопасности являются высокая точность определения надежности характеристик и уровня полноты безопасности. Относительная погрешность при оценке средней наработки до отказа маршрутизатора Keenetic Starter составила 4,2 %, что подтверждает достоверность результатов и адекватность примененной модели. Точность определения уровня функциональной безопасности

достигается за счет корректного расчета интенсивности отказов, средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы, что особенно важно для систем критического назначения. Более того, предложенная методика экономически эффективнее существующей методики, основанной на экспоненциальном распределении, примерно на 39 %.

## Литература

- ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012. *Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования*. М., Стандартинформ, 2014. 58 с.
- Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. *Надежность и эффективность современного электроснабжения: монография*. Нижний Новгород, XXI век, 2021. 160 с.
- Лепешкин О. М., Карпов М. А., Остроумов О. А., Синюк А. Д. Методологический подход управления обеспечением функциональной безопасности и функциональной устойчивости системы связи критически важных объектов и объектов критической информационной инфраструктуры. *FISP-2021: Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации: сб. докл. III Всерос. науч. конф.*, Ставрополь, 30 ноября 2021 г. Ставрополь, 2021, с. 105–110. EDN: СТКМГQ
- Скляр В. В. *Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами*. М., Литрес, 2023. 384 с.
- O'Connor A. N. *Probability Distributions used in Reliability Engineering*. RIAC, 2011. 208 p.
- Meeker W. Q., Escobar L. A., Pascual F. G. *Statistical Methods for Reliability Data*. New York, John Wiley & Sons, 2021. 704 p.
- Perlman M. D. On the strong consistency of approximate maximum likelihood estimators. *Proceedings of the Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, June 21–July 18 1970, Univ. California, Berkeley, California, 1970, vol. 1, pp. 263–281.
- Manole T., Ho N. Refined convergence rates for maximum likelihood estimation under finite mixture models. *International Conference on Machine Learning*, PMLR, 2022, pp. 14979–15006. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08786>
- Wang H., Liserre M., Blaabjerg F., Rimmen P., Jacobsen J., Kvisgaard T. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 97–114. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2290282>
- Lal P., Pecht M. G., Hakim E. B. *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability: A Physics of Failure Approach*. CRC Press, 2020. 336 p.
- Zhan C., Zhu L., Dai J., Zhang Y., Liu J., Liu Z. Wear-out mechanism of press-pack IGBTs under accelerated aging test. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 5132–5141. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3085590>
- Schall J. W., Glaws A., Doumon N. Y., Silverman T. J., Owen-Bellini M., Terwilliger K., Uddin M. A., Rana P. J. S., Berry J. J., Huang J., Schelhas L. T., Kern D. B. Accelerated stress testing of perovskite photovoltaic modules: Differentiating degradation modes with electroluminescence imaging. *Solar RRL*, 2023, vol. 7, no. 14, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/solr.202300229?urlappend>
- Peiravi A. Application of string matching in Internet Security and Reliability. *Marsland Press Journal of American Science*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 25–33.
- ГОСТ Р 27.013-2019. *Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности*. М., Стандартинформ, 2019. 46 с.
- Shama M. S., Alhathi A., Almulhim F., Gemeay A. M., Meraou M. A., Mustafa M. S., Hossam E., Aljohani H. M. Modified generalized Weibull distribution: Theory and applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38942-9>
- Ghazal M. G. M. A new extension of the modified Weibull distribution with applications for engineering data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, vol. 74, Art. 103523. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103523>
- Xia G., Xie X., Wan J., Zhao W. Usability evaluation and maintenance decision of the optical cable based on Weibull proportional hazard model. *Proceedings of the 2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, IEEE, 2020, pp. 1159–1162. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS51417.2020.00282>
- Zhang Q., Hua C., Xu G. A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilising lifetime and monitoring data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 43, no. 1–2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.10.013>
- Lucan K., Dazer M., Waller J., Bertsche B. Analysis of the Weibull estimation for competing failure

## Финансовая поддержка

В данной научной работе использованы результаты проекта № ФИ-2025-4, выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2026 году.

modes. *Proceedings of the 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463053>

20. Takenaga S., Ozaki Y., Onishi M. Practical initialization of the Nelder – Mead method for computationally expensive optimization problems. *Optimization Letters*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 283–297. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01953-y>

21. Nahrath N. Practical experience in reliability analysis with low sample size and competing failure modes. *Proceedings of the 2022 6th International Con-*

*ference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, IEEE, 2022, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1109/ICSRS56243.2022.10067411>

22. Демокидов А. Р., Полесский С. Н., Иванов И. А. Способ расчета уровня полноты безопасности современных маршрутизаторов. *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сб. тр. IV Национальной науч.-практ. конф.*, Калининград, 27–31 мая 2025 г., Калининград, 2025, с. 361–365.

UDC 62-192

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60

EDN: SJKZBG

### Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model

S. N. Polesskiy<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-8066-5162](https://orcid.org/0000-0002-8066-5162), [spolessky@hse.ru](mailto:spolessky@hse.ru)

S. N. Tumkovskiy<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-1647-2171](https://orcid.org/0000-0002-1647-2171), [stumkovskiy@hse.ru](mailto:stumkovskiy@hse.ru)

V. E. Tsvetkov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, Senior Lecturer, [orcid.org/0009-0004-3709-276X](https://orcid.org/0009-0004-3709-276X)

P. S. Korolev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-5720-0498](https://orcid.org/0000-0002-5720-0498)

<sup>a</sup>HSE University, 34, Tallinskaya St., 123458, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The functional safety of network routers used in critical information infrastructure requires quantitative assessment based on dependability data. Existing safety assessment methods do not account for the influence of physical degradation mechanisms under real operating conditions, which reduces the credibility of the results and complicates the adoption of well-founded engineering decisions. **Purpose:** Is to improve the accuracy of the quantitative assessment of router functional safety by developing a methodology that takes into account degradation processes and equipment state parameters under operational conditions. **Results:** Five approaches to dependability assessment were verified: element-wise analysis based on the exponential distribution, analysis of failure statistics, estimation based on defining state parameters, the Weibayes method, and a mixed proportional hazards model. Comparative analysis shows that classical single-parameter models yield a relative error ranging from 29 to 48%, as they ignore the physical mechanisms of degradation. Based on a mixed proportional hazards model with a Weibull distribution, a refined methodology for assessing functional safety measures has been developed, providing a minimum error of 4.2% in estimating the mean time to failure. Experimental validation was performed on a Keenetic Starter router using accelerated testing and monitoring of diagnostic parameters (temperature, CPU load, and memory utilization). A probabilistic–physical approach based on monitoring key state parameters makes it possible to refine the estimate of the mean time to failure and to calculate the average frequency of dangerous failures. **Practical relevance:** The proposed methodology not only improves the accuracy of assessing dependability measures and the safety integrity level, but also reduces the total costs of ensuring the functional safety of network routers within critical information infrastructure, while enhancing the substantiation of engineering decisions in the design of secure networked systems.

**Keywords** – functional safety in critical infrastructure, safety integrity level, probability density function, router, mean time to failure.

**For citation:** Polesskiy S. N., Tumkovskiy S. N., Tsvetkov V. E., Korolev P. S. Methodology for assessing the functional safety of routers based on a physics-based probabilistic model. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 49–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-49-60, EDN: SJKZBG

### Financial support

The study uses the results of project No. FI-2025-4, carried out within the framework of the Basic Research Program at National Research University “Higher School of Economics”, in 2026.

### References

- IEC 61508-1:2010. *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements*. Moscow, Standardinform, 2014. 58 p. (In Russian).
- Papkov B. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L. *Nadyozhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya: monografiya* [Reliability and efficiency of modern power supply. Nizhny Novgorod, XXI Century Publ., 2021. 160 p. (In Russian).
- Lepeshkin O. M., Karpov M. A., Ostroumov O. A., Sinyuk A. D. Methodological approach to ensuring functional safety and functional stability of communication systems for critical facilities and critical information infrastructure. *Trudy III Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii “Fundamental'nye problemy informacionnoy bezopasnosti v usloviyah cifrovoy transformatsii”* [Proc. of the All-Russian Scient. Conf. “Fundamental problems of information security in the context of digital transformation”]. Stavropol, 2021, pp. 105–110 (In Russian). EDN: CTKMGQ
- Skylar V. *Obespechenie bezopasnosti ASUTP v sootvetstvi s sovremennymi standartami* [Ensuring SCADA security in accordance with modern standards]. Moscow, Litres Publ., 2023, 384 p. (In Russian).
- O'Connor A. N. *Probability Distributions used in Reliability Engineering*. RIAC, 2011. 208 p.
- Meeker W. Q., Escobar L. A., Pascual F. G. *Statistical Methods for Reliability Data*. New York, John Wiley & Sons, 2021. 704 p.
- Perlman M. D. On the strong consistency of approximate maximum likelihood estimators. *Proceedings of the Sixth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, June 21–July 18 1970, Univ. California, Berkeley, California, 1970, vol. 1, pp. 263–281.
- Manole T., Ho N. Refined convergence rates for maximum likelihood estimation under finite mixture models. *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2022, pp. 14979–15006. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08786>
- Wang H., Liserre M., Blaabjerg F., Rimmens P., Jacobsen J., Kvisgaard T. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. *IEEE Journal of Emerging*

- and Selected Topics in Power Electronics, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 97–114. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2290282>
10. Lall P., Pecht M. G., Hakim E. B. *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability: A Physics of Failure Approach*. CRC Press, 2020. 336 p.
  11. Zhan C., Zhu L., Dai J., Zhang Y., Liu J., Liu Z. Wear-out mechanism of press-pack IGBTs under accelerated aging test. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 5132–5141. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3085590>
  12. Schall J. W., Glaws A., Doumon N. Y., Silverman T. J., Owen-Bellini M., Terwilliger K., Uddin M. A., Rana P. J. S., Berry J. J., Huang J., Schelhas L. T., Kern D. B. Accelerated stress testing of perovskite photovoltaic modules: Differentiating degradation modes with electroluminescence imaging. *Solar RRL*, 2023, vol. 7, no. 14, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1002/solr.202300229?urlappend>
  13. Peiravi A. Application of string matching in Internet Security and Reliability. *Marsland Press Journal of American Science*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 25–33.
  14. State Standard R 27.013-2019. *Dependability in technics. Reliability assessment methods*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 46 p. (In Russian).
  15. Shama M. S., Alhathi A., Almulhim F., Gemeay A. M., Mer-aou M. A., Mustafa M. S., Hossam E., Aljohani H. M. Modified generalized Weibull distribution: Theory and applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38942-9>
  16. Ghazal M. G. M. A new extension of the modified Weibull distribution with applications for engineering data. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, vol. 74, Art. 103523. <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2023.103523>
  17. Xia G., Xie X., Wan J., Zhao W. Usability evaluation and maintenance decision of the optical cable based on Weibull proportional hazard model. *Proceedings of the 2020 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*, IEEE, 2020, pp. 1159–1162. <https://doi.org/10.1109/ICVRIS51417.2020.00282>
  18. Zhang Q., Hua C., Xu G. A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilizing lifetime and monitoring data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 43, no. 1–2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.10.013>
  19. Lucan K., Dazer M., Waller J., Bertsche B. Analysis of the Weibull estimation for competing failure modes. *Proceedings of the 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463053>
  20. Takenaga S., Ozaki Y., Onishi M. Practical initialization of the Nelder – Mead method for computationally expensive optimization problems. *Optimization Letters*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 283–297. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01953-y>
  21. Nahrath N. Practical experience in reliability analysis with low sample size and competing failure modes. *Proceedings of the 2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, IEEE, 2022, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1109/ICSRS56243.2022.10067411>
  22. Demokidov A. R., Poleskiy S. N., Ivanov I. A. The method for calculation safety integrity level of modern routers. *Sbornik trudov IV Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii "Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovacionnye proekty"* [Proc. of the IV National Scient. and Pract. Conf. "Fundamental, exploratory, applied research and innovative projects"]. Kaliningrad, 2025, pp. 361–365 (In Russian).

## 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>



## Асимптотический анализ системы массового обслуживания с повторными вызовами и динамической интенсивностью обслуживания

С. В. Пауль<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3681-0676](https://orcid.org/0000-0002-3681-0676), [paulsv82@mail.ru](mailto:paulsv82@mail.ru)  
Е. А. Фёдорова<sup>а</sup>, канд физ.-мат. наук, доцент, [orcid.org/0000-0001-8933-5322](https://orcid.org/0000-0001-8933-5322), [ekat\\_fedorova@mail.ru](mailto:ekat_fedorova@mail.ru)  
<sup>а</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Ленина пр., 36, Томск, 634050, РФ

**Введение:** одной из особенностей сетей связи нового поколения является ограниченность вычислительных ресурсов, что нередко приводит к конкуренции в сети при росте запросов, одновременно обрабатываемых на узле. Учет этого эффекта при расчете характеристик математической модели сети связи может повысить производительность и скорость обработки запросов в реальной системе. **Цель:** исследовать математическую модель сети случайного множественного доступа в виде системы массового обслуживания с повторными вызовами, учитывающей зависимость интенсивности обслуживания от числа запросов в системе; найти стационарные распределения вероятностей состояний сервера и числа заблокированных заявок. **Методы:** использован метод асимптотического анализа в предельном условии неограниченного возрастания среднего времени задержек заблокированных заявок. **Результаты:** построена математическая модель сети случайного множественного доступа в виде системы с повторными вызовами с учетом коррелированного характера поступающих требований и интенсивностью обслуживания заявок, зависящей от их общего числа в системе. Получены формулы для расчета предельных среднего и дисперсии числа заблокированных заявок в асимптотическом условии неограниченного возрастания среднего времени задержки, на основе чего построена аппроксимация распределения вероятностей числа заблокированных заявок. Показано, что асимптотическое распределение числа сообщений, ожидающих повторного обращения к серверу, является гауссовским. В результате численного сравнения асимптотического и точного (в частном случае) распределений вероятностей числа заблокированных заявок показано, что полученная аппроксимация имеет достаточно низкую погрешность (менее 3 %) при малых параметрах интенсивности задержки между повторными попытками. **Практическая значимость:** представленный в работе численный пример демонстрирует возможность расчетов основных показателей качества сетей передачи данных на основе предложенной математической модели, которая учитывает важный технический фактор зависимости скорости обслуживания запросов от их общего количества в сети. **Обсуждение:** результаты исследования могут способствовать более эффективному планированию нагрузки на телекоммуникационные сети.

**Ключевые слова** — математическое моделирование, теория массового обслуживания, повторные вызовы, марковский модулированный пуассоновский поток, асимптотический анализ.

**Для цитирования:** Пауль С. В., Фёдорова Е. А. Асимптотический анализ системы массового обслуживания с повторными вызовами и динамической интенсивностью обслуживания. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 61–71. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-61-71, EDN: UKKWUF

**For citation:** Paul S. V., Fedorova E. A. Asymptotic analysis of a queueing system with repeated calls and dynamic service rate. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 61–71 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-61-71, EDN: UKKWUF

### Введение

Развитие интернета вещей (IoT) является одним из ключевых факторов быстрого роста беспроводного доступа и соединений. Ожидается, что в обозримом будущем сети будут эффективно управлять беспроводной средой, способной поддерживать разнообразные устройства, получающие доступ к сети. Подключение в сетях все больше будет определяться объектами, или «вещами», оснащенными сенсорами и преимущественно осуществляющими связь машина-машина. Под модальностью понимается физически регистрируемый элемент коммуникации (человеко-машинной и/или межличностной), включающий как собственно передаваемую информацию, так и информацию о самом источнике [1].

Существует множество различных многомодальных систем, применяемых в повседневной практике: видео-конференц-связь, интерактивные мультимедийные приложения, потоковое вещание, умные дома, транспортные навигационные системы и др. [2, 3]. Каждая из этих систем реализует свои функции с помощью определенных технических решений. При этом одним из ключевых требований является обеспечение приемлемого качества обслуживания, для чего система должна соответствовать установленным требованиям.

Исследования в работе [4] посвящены изучению эффективности развертывания когнитивных радиосетей для улучшения функционирования сложных приложений, включая обеспечение умных городов, где предполагается внедрение

большого количества беспроводных сенсорных узлов с когнитивными радиовозможностями для поддержки взаимосвязанных сервисов. Такие технологии требуют эффективного распределения ограниченных сетевых ресурсов (полосы пропускания) для обслуживания множества устройств и данных, одновременно обеспечивая необходимые показатели производительности.

Важнейшим показателем качества в сетях является временная задержка сигналов, на которую обращается особое внимание при проектировании и эксплуатации таких систем. Однако скорость развития телекоммуникационных технологий не успевает за ростом числа новых устройств IoT и объемов информации. Это приводит к снижению скорости передачи, пропускной способности сетей в последнее время, поэтому актуальной научно-технической проблемой является оптимизация, надежность и эффективное планирование современных телекоммуникационных сетей связи [5, 6].

Одно из научных направлений теории вероятностей — теория массового обслуживания — часто используется для решения таких задач [7–9]. В данной теории для наилучшего описания телекоммуникационных сетей широко применяются модели массового обслуживания с повторными вызовами (retry queueing systems). Отличительной особенностью данных моделей является осуществление повторных попыток получить обслуживание спустя случайное время после отказа, что характерно, например, для телефонных вызовов или протоколов множественного доступа к сетевым ресурсам. В общем случае в таких системах отсутствует очередь (в классическом понимании), а необслуженные требования реализуют задержку из некоторого виртуального места, называемого орбитой. Модели с повторными вызовами подробно описаны в монографиях Дж. Арталежо (J. Artalejo) и Г. И. Фалина [10, 11] и широко применяются в различных практических задачах [9, 10].

Существует большое количество работ по системам с повторными вызовами, однако модели с динамическими параметрами и непуассоновскими входящими потоками изучены слабо. Например, в работах [12–14] исследованы модели с параметром входящего потока заявок, зависящим от состояния системы. При этом обычно рассматриваются модели с переключением между двумя возможными состояниями интенсивности поступления в зависимости от некоторого порогового значения числа клиентов в системе. С другой стороны, допустимо рассматривать и скорость обслуживания как параметр, зависящий от состояния. В работах по этой тематике также учитываются в основном пороговые политики изменения параметров, например в [15,

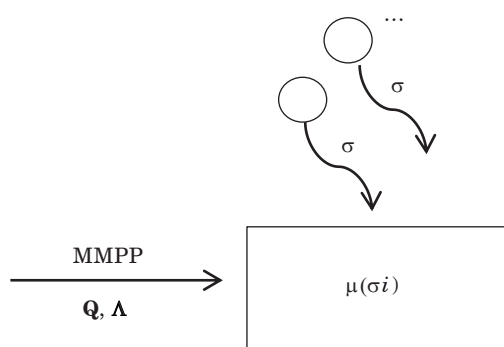
16]. В работах [17, 18] применяется аналогичная политика в моделях с учетом повторного обслуживания клиентов. Также в [18, 19] исследуется модель, в которой интенсивности поступления и обслуживания заданы дискретными функциями от числа повторных клиентов. Ближайшая по смыслу задача решена в [20], где авторы рассмотрели систему с повторными вызовами и зависящими от состояния интенсивностями обслуживания и поступления. Однако модель в [20] отличается от модели в данной работе: в ней реализована политика повторных попыток FCFS (First Come, First Served), т. е. доступ к серверу имеет только один клиент из орбиты. В нашем случае рассматривается система с повторными вызовами и множественным доступом, мотивация которой основана на практических задачах, описанных выше.

Кроме того, почти во всех перечисленных выше работах входящий поток заявок предполагается пуассоновским. Однако простейший поток не всегда адекватно описывает реальные потоки, особенно в телекоммуникационных системах. В работе А. Г. Ложковского [21] показано, что для такого трафика характерна неравномерность интенсивности поступления заявок. Для моделирования и описания потоков информации в мультисервисных сетях связи, сетях связи с протоколами случайного множественного доступа широко применяются непуассоновские модели, учитывающие коррелированный характер поступающих данных, например марковский модулированный пуассоновский поток (Markov Modulated Poisson Process, MMPP) [22].

В данной статье мы развиваем исследование [23] и применяем оригинальный метод асимптотического анализа моделей массового обслуживания с повторными вызовами, с входящим MMPP и динамической интенсивностью обслуживания.

## Математическая модель

Для моделирования сети передачи данных предложим систему с повторными вызовами, одним обслуживающим сервером (каналом) и марковским модулированным пуассоновским входящим потоком поступающих заявок (рис. 1). MMPP является дважды стохастическим потоком событий и функционирует под управлением цепи Маркова с непрерывным временем  $m(t)$  [22, 24], которая задана генератором  $\mathbf{Q} = [q_{vm}]$  (матрицей инфинитезимальных характеристик переходов между состояниями), где  $m(t) = 1, \dots, M$ . Состояния входящего MMPP совпадают с состояниями управляющего процесса  $m(t)$ . Также задается матрица  $\Lambda$  условных интенсивностей



■ **Рис. 1.** Система массового обслуживания с повторными вызовами и динамической интенсивностью обслуживания

■ **Fig. 1.** Queuing system with retrials and dynamic service rate

ММРР с элементами  $\lambda_m, m = 1, \dots, M$ , которые отвечают за интенсивность наступления события в  $m$ -м состоянии.

Если в момент поступления заявки входящего потока сервер свободен, она начинает процесс обслуживания. В противном случае (если заявка, поступая в систему, обнаруживает, что сервер обслуживает другую заявку) поступившая заявка считается заблокированной, и, не покидая систему, она мгновенно уходит на так называемую орбиту, где осуществляет случайную задержку, длительность которой моделируется как экспоненциально распределенная случайная величина с параметром  $\sigma$ . Каждая из заявок на орбите по окончании своей задержки перестает считаться заблокированной и вновь, независимо друг от друга, пытается обратиться к серверу и получить обслуживание. Предполагается, что емкость орбиты неограниченна.

Особенностью исследуемой модели является то, что в ней учитывается динамическое изменение интенсивности обслуживания и зависимость от текущей суммарной интенсивности обращений с орбиты  $\mu(\sigma i)$  (здесь  $i$  — число заблокированных заявок, т. е. их количество на орбите,  $i = 0, 1, \dots$ ). Длительность обслуживания для фиксированного значения  $\sigma i$  имеет экспоненциальный закон распределения. Будем полагать, что если заблокированных заявок в системе нет, т. е. число заявок на орбите равно нулю ( $i = 0$ ), то длительность обслуживания единственной заявки в системе (которая находится на сервере) распределена по экспоненциальному закону с параметром  $\mu = \mu(0)$ .

Введем процессы, которые описывают функционирование предложенной модели:  $i(t)$  — число заблокированных заявок на орбите системы в момент времени  $t, i = 0, 1, \dots; k(t)$  — состояние сервера: 0 — сервер свободен, 1 — сервер занят.

Целью исследования является нахождение стационарных распределений вероятностей состояний сервера предложенной системы  $P\{k(t) = k\} = P(k)$  и числа заявок на орбите  $P\{i(t) = i\} = P(i)$ . Процесс  $i(t)$  марковским процессом не является, поэтому предлагаем аналогично [24] рассмотреть трехмерную цепь Маркова с непрерывным временем  $\{i(t), k(t), m(t)\}$ , где  $m(t)$  — состояние ММРР ( $m = 1, \dots, M$ ). Распределение вероятностей трехмерного марковского процесса  $\{i(t), k(t), m(t)\}$  обозначим как  $P(k, i, m, t) = P\{k(t) = k, i(t) = i, m(t) = m\}$ , что характеризует вероятность того, что в момент времени  $t$  сервер находится в состоянии  $k$ , на орбите  $i$  заблокированных заявок и входящий ММРР находится в состоянии  $m$ . В результате исследования будут получены маргинальные распределения  $P\{k(t) = k\} = P(k)$  и  $P\{i(t) = i\} = P(i)$ .

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова для распределения вероятностей  $P(k, i, m, t)$  состояний трехмерной цепи Маркова  $\{i(t), k(t), m(t)\}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(0, i, m, t)}{\partial t} &= -(\lambda_m + i\sigma)P(0, i, m, t) + \\ &+ \mu(\sigma i)P(1, i, m, t) + \sum_{v=1}^M P(0, i, v, t)q_{vm}, \\ & \quad m = \overline{1, M}, i \geq 0; \\ \frac{\partial P(1, i, m, t)}{\partial t} &= -(\lambda_m + \mu(\sigma i))P(1, i, m, t) + \\ &+ \lambda_m P(1, i-1, m, t) + \\ &+ \lambda_m P(0, i, m, t) + (i+1)\sigma P(0, i+1, m, t) + \\ &+ \sum_{v=1}^M P(1, i, v, t)q_{vm}, m = \overline{1, M}, i \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Систему (1) перепишем в матричном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}(0, i, t)}{\partial t} &= \mathbf{P}(0, i, t)(\mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - i\sigma\mathbf{I}) + \\ &+ \mu(\sigma i)\mathbf{P}(1, i, t); \\ \frac{\partial \mathbf{P}(1, i, t)}{\partial t} &= P(1, i, t)(\mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - \mu(\sigma i)\mathbf{I}) + \\ &+ \mathbf{P}(0, i, t)\mathbf{\Lambda} + \mathbf{P}(1, i-1, t)\mathbf{\Lambda} + \\ &+ (i+1)\sigma\mathbf{P}(0, i+1, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица и векторы

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k, i, t) &= \{P(k, i, 1, t), \\ &P(k, i, 2, t), \dots, P(k, i, M, t)\}, \\ \frac{\partial \mathbf{P}(k, i, t)}{\partial t} &= \left\{ \frac{\partial P(k, i, 1, t)}{\partial t}, \frac{\partial P(k, i, 2, t)}{\partial t}, \dots, \right. \\ & \left. \frac{\partial P(k, i, M, t)}{\partial t} \right\}. \end{aligned}$$

Для решения системы уравнений (2) понадобится так называемое согласованное уравнение, которое получим путем суммирования всех компонент матричных уравнений этой системы. Умножим эти уравнения справа на единичный вектор-столбец  $\mathbf{e}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}(0, i, t)}{\partial t} \mathbf{e} &= \\ &= -\mathbf{P}(0, i, t)(\Lambda + i\sigma\mathbf{I})\mathbf{e} + \mu(\sigma i)\mathbf{P}(1, i, t)\mathbf{e}; \\ \frac{\partial \mathbf{P}(1, i, t)}{\partial t} \mathbf{e} &= -\mathbf{P}(1, i, t)(\Lambda + \mu(\sigma i)\mathbf{I})\mathbf{e} + \mathbf{P}(0, i, t)\Lambda\mathbf{e} + \\ &+ \mathbf{P}(1, i-1, t)\Lambda\mathbf{e} + (i+1)\sigma\mathbf{P}(0, i+1, t)\mathbf{e}; \end{aligned}$$

просуммировав их, получим так называемое согласованное уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}(i, t)}{\partial t} \mathbf{e} &= (\mathbf{P}(1, i-1, t) - \mathbf{P}(1, i, t))\Lambda\mathbf{e} - \\ &- i\sigma\mathbf{P}(0, i, t)\mathbf{e} + (i+1)\sigma\mathbf{P}(0, i+1, t)\mathbf{e}. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (2), (3) в стационарном режиме примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(0, i)(\mathbf{Q} - \Lambda - i\sigma\mathbf{I}) + \mu(\sigma i)\mathbf{P}(1, i) &= 0; \\ \mathbf{P}(1, i)(\mathbf{Q} - \Lambda - \mu(\sigma i)\mathbf{I}) + \mathbf{P}(0, i)\Lambda + \\ + \mathbf{P}(1, i-1)\Lambda + (i+1)\sigma\mathbf{P}(0, i+1) &= 0; \\ (\mathbf{P}(1, i-1) - \mathbf{P}(1, i))\Lambda\mathbf{e} - i\sigma\mathbf{P}(0, i)\mathbf{e} + \\ + (i+1)\sigma\mathbf{P}(0, i+1)\mathbf{e} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решением системы (4) является двумерное распределение вероятностей состояний сервера и числа заблокированных заявок на орбите. Однако его нахождение не представляется возможным классическими аналитическими методами, поэтому предлагается применить метод асимптотического анализа [23–25].

Идея метода заключается в нахождении решения в некотором предельном условии. В данной работе предполагается, что среднее время задержек заблокированных заявок на орбите неограниченно возрастает, что моделируется условием  $\sigma \rightarrow 0$ . В силу этого вводится малый положительный параметр, определяющий предельное условие, делаются замены и осуществляется переход к предельным функциям в основной системе (4).

Метод реализуется в два этапа в предположении, что предельные распределения вероятностей состояний сервера и числа заблокированных запросов в системе независимые. Если предельное распределение вероятностей состояний сервера удастся получить сразу на первом этапе реализации метода, то для построения предельного распределения вероятностей числа заявок на орбите необходимо реализовывать метод в несколько этапов, на каждом из которых находятся

предельные семиинварианты искомого распределения. Понижая порядок малости введенного параметра, реализуя предельное условие, на втором этапе, помимо формулы расчета второго семиинварианта распределения вероятностей числа заблокированных заявок системой, удастся выписать характеристическую функцию искомого распределения, которая, как будет показано далее, имеет гауссовский вид.

### Асимптотический анализ

Метод асимптотического анализа реализуется в два этапа. На первом этапе находится маргинальное распределение вероятностей состояний сервера  $k(t)$  в рассматриваемой системе с учетом зависимости интенсивности обслуживания заявок от числа заблокированных заявок на орбите и параметр  $\kappa_1$ , который определяет асимптотическое среднее  $\kappa_1/\sigma$  процесса  $i(t)$ . На втором этапе применения метода асимптотического анализа выписываются формулы для расчета параметра  $\kappa_2$ , который определяет асимптотическую дисперсию  $\kappa_2/\sigma$  процесса  $i(t)$ . В результате строится асимптотическое гауссовское распределение вероятностей числа заявок на орбите, на основе которого выполняется аппроксимация искомого распределения.

### Асимптотика первого порядка

Обозначим  $\sigma = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — бесконечно малая величина. Введем асимптотические замены:

$$\sigma i = x, \quad \mathbf{P}(k, i) = \mathbf{P}_1(k, x, \varepsilon).$$

Применяя разработанный метод, также введем предельную дифференцируемую функцию непрерывного аргумента  $\tilde{\mu}(x)$ , значения которой в точках  $\sigma i$  на дискретном множестве значений  $i = 1, 2, \dots$  совпадают с заданной в начальной постановке функцией изменения интенсивности обслуживания, т. е.  $\mu(\sigma i) = \tilde{\mu}(x)$ .

Запишем асимптотические уравнения:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \Lambda - x\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x)\mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon) &= 0; \\ \mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \Lambda - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon)\Lambda + \\ + \mathbf{P}_1(1, x - \varepsilon, \varepsilon)\Lambda + (x + \varepsilon)\mathbf{P}_1(0, x + \varepsilon, \varepsilon) &= 0; \\ (\mathbf{P}_1(1, x - \varepsilon, \varepsilon) - \mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon))\Lambda\mathbf{e} - x\mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon)\mathbf{e} + \\ + (x + \varepsilon)\mathbf{P}_1(0, x + \varepsilon, \varepsilon)\mathbf{e} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Пусть существует предел

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \mathbf{P}_1(k, x, \varepsilon) = \mathbf{P}_1(k, x),$$

тогда имеем следующие предельные соотношения:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1(0, x)(\mathbf{Q} - \Lambda - x\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x)\mathbf{P}_1(1, x) &= 0; \\ \mathbf{P}_1(1, x)(\mathbf{Q} - \Lambda - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{P}_1(0, x)\Lambda + \\ + \mathbf{P}_1(1, x)\Lambda + x\mathbf{P}_1(0, x) &= 0; \\ (\mathbf{P}_1(1, x) - \mathbf{P}_1(1, x))\Lambda\mathbf{e} - x\mathbf{P}_1(0, x)\mathbf{e} + x\mathbf{P}_1(0, x)\mathbf{e} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение  $\mathbf{P}_1(k, x)$  этой системы запишем в виде

$$\mathbf{P}_1(k, x) = \mathbf{r}_k(x)\pi_1(x), \quad k = 0, 1, \quad (7)$$

где векторы  $\mathbf{r}_k(x)$  определяют двумерное распределение вероятностей того, что сервер находится в состоянии  $k$ , а входящий ММРР — в состоянии  $m$ .

Из первых уравнений системы (6) получим систему двух матричных уравнений относительно двух векторов  $\mathbf{r}_0(x)$  и  $\mathbf{r}_1(x)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0(x)(\mathbf{Q} - \Lambda - x\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x)\mathbf{r}_1(x) &= 0; \\ \mathbf{r}_1(x)(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{r}_0(x)(\Lambda + x\mathbf{I}) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим  $\mathbf{r}_0(x) + \mathbf{r}_1(x) = \mathbf{r}(x)$  стационарное распределение вероятностей состояний входящего ММРР. Из системы (8) нетрудно получить следующие уравнения, однозначно определяющие вектор  $\mathbf{r}(x)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(x)\mathbf{Q} &= 0; \\ \mathbf{r}(x)\mathbf{e} &= 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда имеют место равенства

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0(x) &= \tilde{\mu}(x) \cdot \mathbf{r}(x) [\tilde{\mu}(x)\mathbf{I} + \Lambda + x\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}; \\ \mathbf{r}_1(x) &= \mathbf{r}(x) [\Lambda + x\mathbf{I}] [\tilde{\mu}(x)\mathbf{I} + \Lambda + x\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

определяющие вероятности состояний сервера и распределение вероятностей состояний ММРР.

Вернемся к согласованному уравнению системы (5). Используя разложение функций  $\mathbf{P}_1(k, x, \varepsilon)$  в ряд Тейлора по приращению  $\varepsilon$  в окрестности точки  $x$ , запишем уравнение с точностью до  $O(\varepsilon^2)$ :

$$\begin{aligned} \left( \left[ \mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon) - \varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon)}{\partial x} \right] - \mathbf{P}_1(1, x, \varepsilon) \right) \Lambda \mathbf{e} - \\ - x \mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon) \mathbf{e} + \\ + \left[ x \mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon) + \varepsilon \frac{\partial x \mathbf{P}_1(0, x, \varepsilon)}{\partial x} \right] \mathbf{e} = O(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Реализуя несложные алгебраические преобразования, в пределе  $\varepsilon \rightarrow 0$  получим равенство

$$-\frac{\partial}{\partial x} \{ \mathbf{P}_1(1, x) \Lambda \mathbf{e} - x \mathbf{P}_1(0, x) \mathbf{e} \} = 0,$$

в которое подставим решение (7) и запишем

$$-\frac{\partial}{\partial x} \{ \pi_1(x) (\mathbf{r}_1(x) \Lambda \mathbf{e} - x \mathbf{r}_0(x) \mathbf{e}) \} = 0. \quad (12)$$

откуда в силу стационарности параметры системы удовлетворяют следующему равенству [24]:

$$\mathbf{r}_1(x) \Lambda \mathbf{e} - x \mathbf{r}_0(x) \mathbf{e} = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) является нелинейным относительно  $x$ , обозначим решение данного уравнения  $x = \kappa_1$ . Стоит заметить, что решение уравнения (13) необходимо осуществлять совместно с решением системы уравнений (8), явный вид функций  $\mathbf{r}_0(x)$ ,  $\mathbf{r}_1(x)$  и параметра  $\kappa_1$  получить не удастся.

Обратные замены к  $\sigma i = x = \kappa_1$  позволяют сделать вывод о том, что асимптотическое среднее число заявок на орбите (среднее значение процесса  $i(t)$ ) равно  $\kappa_1/\sigma$ .

На втором этапе реализации метода получим формулы для расчета распределения вероятностей числа заявок на орбите.

#### Асимптотика второго порядка

Обозначим  $\sigma = \varepsilon^2$  и выполним замены:

$$\sigma i = x + \varepsilon y, \quad \mathbf{P}(k, i) = \mathbf{P}_2(k, y, \varepsilon), \quad \mu(i) = \tilde{\mu}(x + \varepsilon y).$$

Из системы (4) получим асимптотические уравнения

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \Lambda - (x + \varepsilon y)\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x + \varepsilon y)\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon) &= 0; \\ \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \Lambda - \tilde{\mu}(x + \varepsilon y)\mathbf{I}) + \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)\Lambda + \\ + \mathbf{P}_2(1, y - \varepsilon, \varepsilon)\Lambda + (x + \varepsilon(y + \varepsilon))\mathbf{P}_2(0, y + \varepsilon, \varepsilon) &= 0; \\ (\mathbf{P}_2(1, y - \varepsilon, \varepsilon) - \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon))\Lambda \mathbf{e} - \\ - (x + \varepsilon y)\mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)\mathbf{e} + \\ + (x + \varepsilon(y + \varepsilon))\mathbf{P}_2(0, y + \varepsilon, \varepsilon)\mathbf{e} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

В первом и втором уравнении системы (14) запишем разложение функций  $\mathbf{P}_2(k, y \pm \varepsilon, \varepsilon)$  с точностью до  $O(\varepsilon^2)$ . Выполнив преобразования, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \Lambda - (x + \varepsilon y)\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x + \varepsilon y)\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon) &= 0; \\ \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x + \varepsilon y)\mathbf{I}) + \\ + \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)(\Lambda + (x + \varepsilon y)\mathbf{I}) - \\ - \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \{ \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)\Lambda - x \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon) \} &= O(\varepsilon^2). \end{aligned} \quad (15)$$

Запишем функцию  $\tilde{\mu}(x + \varepsilon y)$  в виде разложения:

$$\tilde{\mu}(x + \varepsilon y) = \tilde{\mu}(x) + \varepsilon y \tilde{\mu}'(x) + O(\varepsilon^2).$$

Подставляя данное выражение в уравнения (15), имеем

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \mathbf{A} - x\mathbf{I}) + \tilde{\mu}(x)\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon) = \\ & = \varepsilon y \{ \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon) - \tilde{\mu}'(x)\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon) \} + O(\varepsilon^2); \\ & \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)(\mathbf{A} + x\mathbf{I}) = \\ & = \varepsilon y \{ \tilde{\mu}'(x)\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon) - \mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon) \} + \\ & + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \{ \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)\mathbf{A} - x\mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon) \} + O(\varepsilon^2). \quad (16) \end{aligned}$$

Решение  $\mathbf{P}_2(k, y, \varepsilon)$  этой системы будем искать в виде разложения следующего вида:

$$\mathbf{P}_2(k, y, \varepsilon) = \mathbf{r}_k \pi_2(y) + \varepsilon \mathbf{f}_k(y) \pi_2'(y) + O(\varepsilon^2), \quad (17)$$

где векторы вероятностей  $\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_k(\kappa_1)$ ,  $k = 0, 1$ , определены выражениями (10) при значении  $x = \kappa_1$ .

Система (16) переписется в виде

$$\begin{aligned} & \{ \mathbf{r}_0 \pi_2(y) + \varepsilon \mathbf{f}_0(y) \pi_2'(y) \} (\mathbf{Q} - \mathbf{A} - x\mathbf{I}) + \\ & + \tilde{\mu}(x) \{ \mathbf{r}_1 \pi_2(y) + \varepsilon \mathbf{f}_1(y) \pi_2'(y) \} = \\ & = \varepsilon y \pi_2(x) \{ \mathbf{r}_0 - \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1 \} + O(\varepsilon^2); \\ & \{ \mathbf{r}_1 \pi_2(y) + \varepsilon \mathbf{f}_1(y) \pi_2'(y) \} (\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \\ & + \{ \mathbf{r}_0 \pi_2(y) + \varepsilon \mathbf{f}_0(y) \pi_2'(y) \} (\mathbf{A} + x\mathbf{I}) = \\ & = \varepsilon y \pi_2(y) \{ \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0 \} + \\ & + \varepsilon \frac{\partial \pi_2(y)}{\partial y} \{ \mathbf{r}_1 \mathbf{A} - x\mathbf{r}_0 \} + O(\varepsilon^2). \quad (18) \end{aligned}$$

Выполним преобразования, в предельном условии  $\varepsilon \rightarrow 0$  получим

$$\begin{aligned} & \mathbf{f}_0(y)(\mathbf{Q} - \mathbf{A} - x\mathbf{I}) + \mathbf{f}_1(y)\tilde{\mu}(x) = y \frac{\pi_2(y)}{\pi_2'(y)} \{ \mathbf{r}_0 - \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1 \}; \\ & \mathbf{f}_1(y)(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{f}_0(y)(\mathbf{A} + x\mathbf{I}) = \\ & = y \frac{\pi_2(y)}{\pi_2'(y)} \{ \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0 \} + \mathbf{r}_1 \mathbf{A} - x\mathbf{r}_0. \quad (19) \end{aligned}$$

Запишем решение  $\mathbf{f}_k(y)$  неоднородной СЛАУ (19) в виде суперпозиции общего решения однородной СЛАУ и частных решений неоднородной системы:

$$\mathbf{f}_k(y) = C\mathbf{r}_k + \mathbf{g}_k + y \frac{\pi_2(y)}{\pi_2'(y)} \boldsymbol{\varphi}_k, \quad (20)$$

где векторы  $\mathbf{g}_k$  и  $\boldsymbol{\varphi}_k$  удовлетворяют следующим неоднородным СЛАУ:

$$\begin{aligned} & \boldsymbol{\varphi}_0(\mathbf{Q} - \mathbf{A} - x\mathbf{I}) + \boldsymbol{\varphi}_1 \tilde{\mu}(x) = \mathbf{r}_0 - \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1; \\ & \boldsymbol{\varphi}_1(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \boldsymbol{\varphi}_0(\mathbf{A} + x\mathbf{I}) = \tilde{\mu}'(x)\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0; \\ & \mathbf{g}_0(\mathbf{Q} - \mathbf{A} - x\mathbf{I}) + \mathbf{g}_1 \tilde{\mu}(x) = 0; \\ & \mathbf{g}_1(\mathbf{Q} - \tilde{\mu}(x)\mathbf{I}) + \mathbf{g}_0(\mathbf{A} + x\mathbf{I}) = \mathbf{r}_1 \mathbf{A} - x\mathbf{r}_0, \quad (21) \end{aligned}$$

и дополнительным условиям  $(\mathbf{g}_0 + \mathbf{g}_1)\mathbf{e} = 0$ ,  $(\boldsymbol{\varphi}_0 + \boldsymbol{\varphi}_1)\mathbf{e} = 0$  при значении  $x = \kappa_1$ .

Вернемся к последнему уравнению системы (14), запишем его с точностью до  $O(\varepsilon^3)$ :

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \{ -\mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)\mathbf{A}\mathbf{e} + (x + \varepsilon y)\mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)\mathbf{e} \} + \\ & + \frac{\varepsilon^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \{ \mathbf{P}_2(1, y, \varepsilon)\mathbf{A}\mathbf{e} + x\mathbf{P}_2(0, y, \varepsilon)\mathbf{e} \} = O(\varepsilon^3). \end{aligned}$$

В последнее уравнение подставим решение (17), после некоторых преобразований в предельном условии  $\varepsilon \rightarrow 0$  получим

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial y} \{ \pi_2'(y)(x\mathbf{f}_0(y)\mathbf{e} - \mathbf{f}_1(y)\mathbf{A}\mathbf{e}) + y\pi_2(y)\mathbf{r}_0\mathbf{e} \} + \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \pi_2(y)}{\partial y^2} \{ \mathbf{r}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + x\mathbf{r}_0\mathbf{e} \} = 0. \end{aligned}$$

Учитывая (20) и упрощая, окончательно имеем следующее дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial y} \{ y\pi_2(y)(\boldsymbol{\varphi}_0 x\mathbf{e} - \boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{r}_0\mathbf{e}) \} + \\ & + \frac{\partial^2 \pi_2(y)}{\partial y^2} (\mathbf{r}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{g}_0 x\mathbf{e} - \mathbf{g}_1 \mathbf{A}\mathbf{e}) = 0, \end{aligned}$$

откуда несложно получить обыкновенное однородное дифференциальное уравнение относительно функции  $\pi_2(y)$

$$\pi_2'(y) \frac{\mathbf{r}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{g}_0 x\mathbf{e} - \mathbf{g}_1 \mathbf{A}\mathbf{e}}{\boldsymbol{\varphi}_0 x\mathbf{e} - \boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{r}_0\mathbf{e}} + y\pi_2(y) = 0,$$

решение которого имеет вид

$$\pi_2(y) = \exp \left\{ \frac{(jy)^2 \kappa_2}{2} \right\}$$

с параметром

$$\kappa_2 = \frac{\mathbf{r}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{g}_0 x\mathbf{e} - \mathbf{g}_1 \mathbf{A}\mathbf{e}}{\boldsymbol{\varphi}_0 x\mathbf{e} - \boldsymbol{\varphi}_1 \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{r}_0\mathbf{e}}, \quad (22)$$

который определяет дисперсию асимптотического распределения.

Объединяя результаты обеих асимптотик и применяя обратные замены, получим, что предельное распределение числа заблокированных заявок на орбите подчиняется гауссовскому закону распределения случайных величин с математическим ожиданием  $\kappa_1/\sigma$ , определяемым уравнением (13), и дисперсией  $\kappa_2/\sigma$ , определяемой формулой (22).

Для построения аппроксимации исследуемого случайного процесса  $i(t)$  — числа заявок на орбите в рассматриваемой модели — введем обозначение  $F(x)$  — функцию распределения вероятностей нормально распределенной случайной величины, которая определяется параметрами  $\kappa_1/\sigma$  и  $\kappa_2/\sigma$ .

Полученное предельное гауссовское распределение является непрерывным распределением, принимающим значения в диапазоне  $(-\infty, +\infty)$ . В свою очередь процесс  $i(t)$  числа заблокированных заявок системой принимает неотрицательные дискретные значения. Чтобы получить из гауссовского распределения закон распределения дискретной случайной величины, выполним его дискретизацию и нормирование.

Для построения аппроксимации дискретного распределения  $P(i)$  числа  $i$  заблокированных заявок в системе предлагается следующая формула:

$$P_A(i) = \frac{F(i + 0,5) - F(i - 0,5)}{1 - F(-0,5)}. \quad (23)$$

Отметим, что числитель в формуле (23) определяет вероятность попадания значения случайной величины в интервал  $(i - 0,5; i + 0,5)$ , а знаменатель обеспечивает условие нормировки с учетом того, что физически число заявок не может принимать значение из отрицательной области.

Дискретное распределение вероятностей  $P_A(i)$  будем называть гауссовской аппроксимацией распределения вероятностей  $P(i)$  числа  $i$  заблокированных заявок в системе.

Формализуем приведенные выше исследования для наглядности в виде следующего алгоритма построения аппроксимации распределения вероятностей числа заявок на орбите в предельном условии неограниченного возрастания среднего времени задержек заблокированных заявок на орбите ( $\sigma \rightarrow 0$ ).

1. Зададим матрицы  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{A}$ , определяющие входящий ММРР, значения параметров системы  $\sigma$ ,  $\mu(\sigma i)$  и аппроксимирующую ее предельную функцию  $\tilde{\mu}(x)$ .

2. Найдем значение параметра  $\kappa_1$ , решая уравнение (14).

3. Найдем значения векторов  $\mathbf{r}_k$ , решая системы (9) и (10) при  $x = \kappa_1$ .

4. Найдем значения векторов  $\mathbf{g}_0$ ,  $\mathbf{g}_1$ ,  $\Phi_0$  и  $\Phi_1$ , удовлетворяющие дополнительным условиям  $(\mathbf{g}_0 + \mathbf{g}_1)\mathbf{e} = 0$ ,  $(\Phi_0 + \Phi_1)\mathbf{e} = 0$ , решая систему (20) при  $x = \kappa_1$ .

5. Найдем значение параметра  $\kappa_2$ , решая уравнение (22).

6. Построим гауссовскую аппроксимацию  $P_A(i)$  распределения вероятностей  $P(i) = P\{i(t) = i\}$

числа  $i$  заблокированных заявок в системе с использованием метода асимптотического анализа по формуле (23).

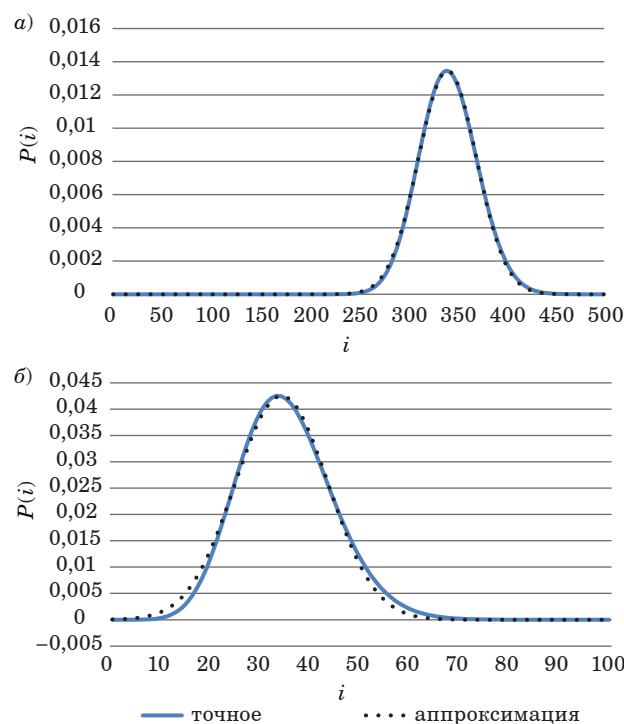
### Оценка точности аппроксимации

В частном случае рассмотренной модели с входящим пуассоновским потоком с интенсивностью  $\lambda$  система уравнений (4) для стационарного распределения вероятностей состояний системы имеет скалярный вид

$$\begin{aligned} -P(0, i)(\lambda + i\sigma) + \mu(i)P(1, i) &= 0; \\ -P(1, i)(\lambda + \mu(i)) + \lambda P(0, i) + \\ + \lambda P(1, i - 1) + (i + 1)\sigma P(0, i + 1) &= 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Нетрудно заметить, что из системы (24) можно получить рекуррентные соотношения для вычисления стационарных вероятностей. Таким образом, реализовав численный алгоритм вычисления стационарного распределения для частного случая системы, можно оценить погрешность предлагаемой аппроксимации (23).

Сравнение численного и предельного распределений при параметрах со значениями  $\lambda = 0,5$ ,



■ **Рис. 2.** Точное и предельное распределение при параметре  $\sigma = 0,01$  (а) и  $\sigma = 0,1$  (б)  
 ■ **Fig. 2.** The exact and asymptotic distributions for parameter  $\sigma = 0,01$  (a) and  $\sigma = 0,1$  (b)

- Расстояние Колмогорова
- Kolmogorov distance

$\lambda$	Значения расстояния при		
	$\sigma = 1$	$\sigma = 0,1$	$\sigma = 0,01$
0,3	0,120	0,029	0,011
0,5	0,069	0,025	0,008
0,7	0,082	0,028	0,009

$\mu(i) = \sqrt{\frac{i+1}{i+10}}$ ,  $\sigma = 0,01$  и  $\sigma = 0,1$  представлено на рис. 2, а и б.

Как видно из рисунка, предлагаемая аппроксимация имеет высокую точность и не только в случае долгой задержки заявок на орбите, но и для значений параметра  $\sigma$  того же порядка, что интенсивность входящего потока  $\lambda$ .

В качестве критерия близости распределений выберем расстояния Колмогорова

$$\Delta = \max_i |F_a(i) - F_{ex}(i)|,$$

где  $F_a(i)$  — функция асимптотического распределения вероятностей, а  $F_{ex}(i)$  — функция распределения вероятностей, полученного численно.

В таблице представлены результаты оценки погрешности аппроксимации — вычисленные значения расстояния Колмогорова при различных значениях интенсивности входящего потока и параметра задержки.

**Численный пример расчета показателей качества**

Рассчитаем вероятностные характеристики канала связи, предназначенного для передачи видеопотока в мультимодальной сети со следующими характеристиками входящего потока:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{pmatrix} \text{ Кбит/с;}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} -0,5 & 0,2 & 0,3 \\ 0,2 & -0,3 & 0,1 \\ 0,2 & 0,3 & -0,5 \end{pmatrix},$$

интенсивность повторного обращения при неудачной передаче  $\sigma = 100$  Кбит/с.

Пусть функция изменения скорости передачи

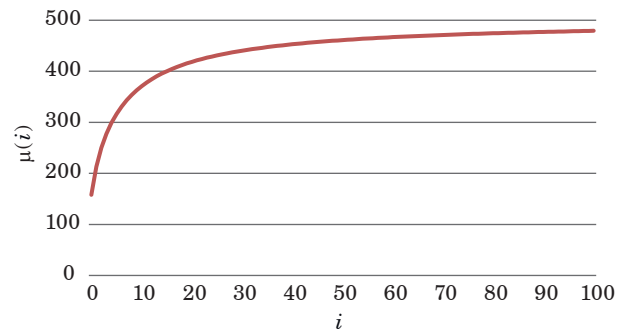
$$\mu(i) = \sqrt{\frac{i+1}{i+10}} \cdot 500 \text{ Кбит/с}$$

имеет вид, представленный на рис. 3.

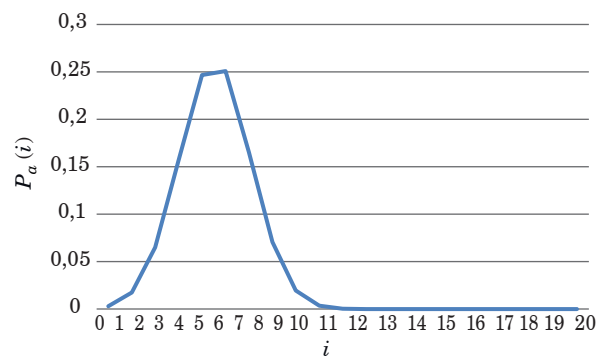
График аппроксимирующего распределения вероятностей числа повторных обращений представлен на рис. 4. Среднее число заблокированных пакетов в рассматриваемом примере равно 4,5.

Стационарные вероятности состояний канала принимают следующие значения при заданных параметрах системы: с вероятностью  $r_0 = 0,404$  канал будет свободен, с вероятностью  $r_1 = 0,596$  канал будет занят передачей. Сходимость вероятностей состояний канала к стационарным значениям показана на рис. 5.

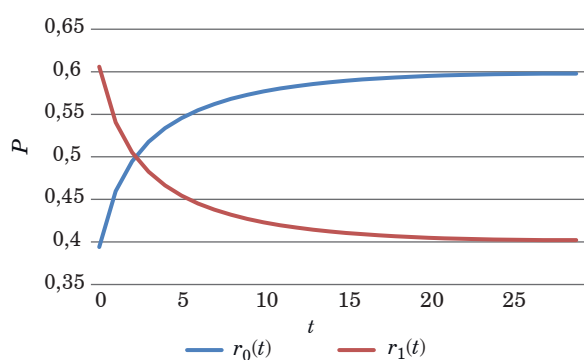
Таким образом, с помощью результатов проведенного аналитического исследования можно оценить основные характеристики телекомму-



■ **Рис. 3.** Пример функции изменения скорости передачи  
 ■ **Fig. 3.** Example of bit rate variation function



■ **Рис. 4.** Стационарное распределение вероятностей числа пакетов на передачу  
 ■ **Fig. 4.** Stationary probability distribution of the number of packets to be transmitted



■ **Рис. 5.** Динамические вероятности состояния канала от числа пакетов на передачу ( $r_0$  – канал свободен,  $r_1$  – канал занят)

■ **Fig. 5.** Channel state dynamic probabilities as a function of the number of transmission packets ( $r_0$  – channel is free,  $r_1$  – channel is busy)

никационных сетей, задавая на вход модели значения, полученные из статистических данных.

## Заключение

Предложенная в работе модель системы массового обслуживания с повторными вызовами, коррелированным потоком заявок и динамической скоростью обслуживания точнее отражает процессы множественного доступа в современных телекоммуникационных сетях с меняю-

щейся интенсивностью запросов в сравнении с представленными в литературе классическими моделями с простейшим входящим потоком [18, 20]. Таким образом, применение результатов моделирования позволяет более точно оценить требуемые характеристики сетей передачи информации [8, 9].

Применение метода асимптотического анализа позволило установить, что асимптотическое распределение числа заблокированных заявок стремится к нормальному распределению при увеличении среднего времени задержки. Этот вывод существенно упрощает оценку распределения числа заблокированных пользователей в реальных сетях, поскольку для построения распределения достаточно определить лишь статистические оценки математического ожидания и дисперсии анализируемой величины, что значительно облегчает нахождение более сложных характеристик, необходимых для выполнения требований к уровню качества.

Численный анализ результатов показал, что гауссовская аппроксимация демонстрирует высокую точность при уменьшении параметра интенсивности повторных обращений, достигая погрешности менее 3 %.

Таким образом, разработанный подход расширяет возможности исследования систем массового обслуживания и открывает перспективы дальнейшего изучения систем более сложной конфигурации, например с произвольным числом серверов.

## Литература

1. **Ryndin A. V.** Methodology for evaluating the efficiency of multimodal information transmission. *Proceedings of X All-Russian Scientific Conference "Synthesis and Applied Synergetics"*, 2023, pp. 139–144. doi:10.18522/syssyn-2022-27
2. **Abdulhamit S., Saeed M. Q., Humaira N.** *Artificial Intelligence and Multimodal Signal Processing in Human-Machine Interaction*. Academic Press, 2025. 406 p. doi:10.1016/B978-0-443-29150-0.09990-X
3. **Dritsas E., Trigka M., Troussas C., Mylonas P.** Multimodal interaction, interfaces, and communication: A survey. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2025, vol. 9, iss. 1, 6 p. doi:10.3390/mti9010006
4. **Alfa A. S., Ghazaleh H. Abu, Maharaj B. T.** Performance analysis of multi-modal overlay/underlay switching service levels in cognitive radio networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 78442–78453. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923563
5. **Дараселия А. В., Сопин Э. С., Самуйлов К. Е., Кучерявый Е. А.** Минимизация задержки в системах 5G/6G IoT с групповым поступлением в восходящем и нисходящем направлениях. *Информатика и ее применения*, 2024, т. 18, вып. 4, с. 59–67. doi:10.14357/19922264240408, EDN: EBGJBZ
6. **Sabuncu Ö., Bilgehan B.** Novel statistical modelling and optimization techniques of fading channel coefficients for 5G network performance. *Journal of Network and Systems Management*, 2025, vol. 33, Article 42. doi:10.1007/s10922-025-09905-4
7. **Zin T. T., Moe A. S. T., Phyo C. N., Tin P.** Fusion of strategic queueing theory and AI for smart city telecommunication system. *2024 IEEE 21st International Conference on Mobile Ad-Hoc and Smart Systems (MASS)*, Seoul, Republic of Korea, 2024, pp. 653–657. doi:10.1109/MASS62177.2024.00104
8. **Вишневский В. М.** *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. М., Техносфера, 2003. 512 с.
9. **Степанов С. Н.** *Теория телетрафика: концепции, модели, приложения*. М., Горячая линия-Телеком, 2015. 868 с.
10. **Artalejo J. R., Gomez-Corral A.** *Retrial Queueing Systems. A Computational Approach*. Springer, Berlin, 2008. 318 p. doi:10.1007/978-3-540-78725-9

11. Falin G., Templeton J. *Retrial Queues*. Taylor & Francis, 1997.
12. Artalejo J. R., Li Q. L. Performance analysis of a block-structured discrete-time retrial queue with state-dependent arrivals. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2010, vol. 20, iss. 3, pp. 325–347. doi:10.1007/s10626-009-0075-6
13. Dimitriou I. A single server retrial queue with event-dependent arrival rates. *Ann. Oper. Res.*, 2023, vol. 331, pp. 1053–1088. doi:10.1007/s10479-023-05263-z
14. Gupta P., Kumar N. Analysis of classical retrial queue with differentiated vacation and state dependent arrival rate. *Ratio Math*, 2021, vol. 40, pp. 47–66. doi:10.23755/rm.v40i1.607
15. Ingolfssoon A., Almedhawe E., Pedram A., Tran M. Comparison of fluid approximations for service systems with state-dependent service rates and return probabilities. *European Journal of Operational Research*, 2020, vol. 283, pp. 562–575. doi:10.1016/j.ejor.2019.11.041
16. Lv Sh., Zhu L. Single server repairable queueing system with variable service rate and failure rate. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 1233–1239. doi:10.1109/access.2020.3047815, EDN: UXLXOK
17. Ponomarov V., Lebedev E. Optimal control of retrial queues with finite population and state-dependent service rate. *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing?* Las Vegas, 12–14 Dec. 2018, vol. 754, pp. 359–369. doi:10.1007/978-3-319-91008-6\_36
18. Jain M., Sanga S. S. *F-policy for M/M/1/k retrial queueing model with state-dependent rates*. In: *Performance Prediction and Analytics of Fuzzy, Reliability and Queueing Models*. Deep K., Jain M., Salhi S. (eds). Springer, Singapore, 2019, pp. 127–138. doi:10.1007/978-981-13-0857-4\_9
19. Jain M., Sanga S. S. Admission control for finite capacity queueing model with general retrial times and state-dependent rates. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2020, vol. 16, iss. 6, pp. 2625–2649. doi:10.3934/jimo.2019073
20. Baron O., Economou A., Manou A. The state-dependent M/G/1 queue with orbit. *Queueing Systems*, 2018, vol. 90, pp. 89–123. doi:10.1007/s11134-018-9582-1
21. Ложковский А. Г., Каптур В. А., Вербанов О. В., Колчар В. М. Математическая модель пакетного трафика. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, 2011, № 9, с. 113–119.
22. Naumov V., Gaidamaka Y., Yarkina N., Samouylov K. *Matrix and Analytical Methods for Performance Analysis of Telecommunication Systems*. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. 305 p. doi:10.1007/978-3-030-83132-5
23. Nazarov A. A., Fedorova E. A., Lizyura O. D., Salimzianov R. R. Asymptotic diffusion method for retrial queues with state-dependent service rate. *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 3, Article 3140. doi:10.3390/math11143140
24. Пауль С. В., Назаров А. А., Лапатин И. Л., Иванова А. С. Моделирование производительности облачного узла при коррелированном характере нагрузки. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2025, № 4 (40), с. 90–101.
25. Nazarov A., Paul S., Lizyura O. Asymptotic analysis of Markovian retrial queue with unreliable server and multiple types of outgoing calls. *Glob. Stoch. Anal.*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 143–149.

UDC 519.872

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-61-71

EDN: UKKWUF

**Asymptotic analysis of a queueing system with repeated calls and dynamic service rate**S. V. Paul<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-3681-0676, paulsv82@mail.ruE. A. Fedorova<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-8933-5322, ekat\_fedorova@mail.ru<sup>a</sup>National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russian Federation

**Introduction:** One of the features of next-generation networks is the limited computing resources, which often leads to network competition as the number of requests simultaneously processed by a node increases. Taking this effect into account in a mathematical modelling can improve the performance and speed of request processing in a real system. **Purpose:** To study a mathematical model of a random multiple access network in the form of a queueing system with repeated calls, taking into account the dependence of the service intensity on the number of requests in the system; to find the stationary probability distribution of server states and the number of blocked customers. **Methods:** The asymptotic analysis method is applied under the limiting condition of unlimited increase of average delay time of blocked customers. **Results:** We have constructed the mathematical model of a random multiple access network in the form of a retrial system, taking into account the correlated nature of arrival requests and service rate dependent on their total number of customers in the system. We have derived formulas for calculating the asymptotic mean and variance of the number of blocked customers under the condition of unlimited increase of average delay time, which allows obtaining the approximation of probability distribution. It has been shown that the asymptotic distribution is Gaussian. As a result of numerical comparison between the asymptotic and exact distributions of probabilities (in a particular case), we show that the obtained approximation has sufficiently low error (< 3%) at small parameters of delay between retry attempts. **Practical relevance:** The presented numerical example demonstrates the possibility of calculating key performance indicators of data transmission networks using the proposed mathematical model, which takes into account the important

technical factor of the dependence of the service speed on the total number of requests in the network. **Discussion:** The research results can contribute to more efficient load planning for telecommunication networks.

**Keywords** – mathematical modeling, queueing theory, repeated calls, Markov-modulated Poisson arrival process, asymptotic analysis.

**For citation:** Paul S. V., Fedorova E. A. Asymptotic analysis of a queueing system with repeated calls and dynamic service rate. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 61–71 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-61-71, EDN: UKKWUF

## References

- Ryndin A. V. Methodology for evaluating the efficiency of multimodal information transmission. *Proceedings of X All-Russian Scientific Conference "Synthesis and Applied Synergetics"*, 2023, pp. 139–144. doi:10.18522/sysshyn-2022-27
- Abdulhamit S., Saeed M. Q., Humaira N. *Artificial Intelligence and Multimodal Signal Processing in Human-Machine Interaction*. Academic Press, 2025. 406 p. doi:10.1016/B978-0-443-29150-0.09990-X
- Dritsas E., Trigka M., Troussas C., Mylonas P. Multimodal interaction, interfaces, and communication: A survey. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2025, vol. 9, iss. 1, 6 p. doi:10.3390/mti9010006
- Alfa A. S., Ghazaleh H. Abu, Maharaj B. T. Performance analysis of multi-modal overlay/underlay switching service levels in cognitive radio networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 78442–78453. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923563
- Daraseliya A. V., Sopin E. S., Samuylov K. E., Koucheryavy E. A. Minimizing latency in 5G/6G IoT systems with group admission in ascending and descending directions. *Informatics and Applications*, 2024, vol. 18, iss. 4, pp. 59–67 (In Russian). doi:10.14357/19922264240408, EDN: EBGJBZ
- Sabuncu Ö., Bilgehan B. Novel statistical modelling and optimization techniques of fading channel coefficients for 5G network performance. *Journal of Network and Systems Management*, 2025, vol. 33, Article 42. doi:10.1007/s10922-025-09905-4
- Zin T. T., Moe A. S. T., Phyo C. N., Tin P. Fusion of strategic queueing theory and AI for smart city telecommunication system. *2024 IEEE 21st International Conference on Mobile Ad-Hoc and Smart Systems (MASS)*, Seoul, Republic of Korea, 2024, pp. 653–657. doi:10.1109/MASS62177.2024.00104
- Vishnevsky V. M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setey* [Theoretical foundations of designing computer networks]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 512 p. (In Russian).
- Stepanov S. N. *Teoriya teletrafika: kontseptsii, modeli, prilozheniya*. [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telecom Publ., 2015. 868 p. (In Russian).
- Artalejo J. R., Gomez-Corral A. *Retrial Queueing Systems. A Computational Approach*. Springer, Berlin, 2008. 318 p. doi:10.1007/978-3-540-78725-9
- Falin G., Templeton J. *Retrial Queues*. Taylor & Francis, 1997.
- Artalejo J. R., Li Q. L. Performance analysis of a block-structured discrete-time retrial queue with state-dependent arrivals. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2010, vol. 20, iss. 3, pp. 325–347. doi:10.1007/s10626-009-0075-6
- Dimitriou I. A single server retrial queue with event-dependent arrival rates. *Ann. Oper. Res.*, 2023, vol. 331, pp. 1053–1088. doi:10.1007/s10479-023-05263-z
- Gupta P., Kumar N. Analysis of classical retrial queue with differentiated vacation and state dependent arrival rate. *Ratio Math*, 2021, vol. 40, pp. 47–66. doi:10.23755/rm.v40i1.607
- Ingolfsson A., Almeddawe E., Pedram A., Tran M. Comparison of fluid approximations for service systems with state-dependent service rates and return probabilities. *European Journal of Operational Research*, 2020, vol. 283, iss. 2, pp. 562–575. doi:10.1016/j.ejor.2019.11.041
- Ly Sh., Zhu L. Single server repairable queueing system with variable service rate and failure rate. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 1233–1239. doi:10.1109/access.2020.3047815, EDN: UXLXOK
- Ponomarov V., Lebedev E. Optimal control of retrial queues with finite population and state-dependent service rate. *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Las Vegas, 12–14 Dec. 2018, vol. 754, pp. 359–369. doi:10.1007/978-3-319-91008-6\_36
- Jain M., Sanga S. S. *F-policy for M/M/1/k retrial queueing model with state-dependent rates*. In: *Performance Prediction and Analytics of Fuzzy, Reliability and Queueing Models*. Deep K., Jain M., Salhi S. (eds). Springer, Singapore, 2019, pp. 127–138. doi:10.1007/978-981-13-0857-4\_9
- Jain M., Sanga S. S. Admission control for finite capacity queueing model with general retrial times and state-dependent rates. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2020, vol. 16, iss. 6, pp. 2625–2649. doi:10.3934/jimo.2019073
- Baron O., Economou A., Manou A. The state-dependent M/G/1 queue with orbit. *Queueing Systems*, 2018, vol. 90, pp. 89–123. doi:10.1007/s11134-018-9582-1
- Lozhkovsky A. G., Kaptur V. A., Verbanov O. V., Kolchar V. M. Matematicheskaya model' paketnogo trafika [Mathematical model of packet traffic]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI"*, 2011, no. 9, pp. 113–119 (In Russian).
- Naumov V., Gaidamaka Y., Yarkina N., Samouylov K. *Matrix and Analytical Methods for Performance Analysis of Telecommunication Systems*. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. 305 p. doi:10.1007/978-3-030-83132-5
- Nazarov A. A., Fedorova E. A., Lizyura O. D., Salimzianov R. R. Asymptotic diffusion method for retrial queues with state-dependent service rate. *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 3, Article 3140. doi:10.3390/math11143140
- Paul S. V., Nazarov A. A., Lapatin I. L., Ivanova A. S. Modeling cloud node performance under correlated load conditions. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2025, no. 4 (40), pp. 90–101 (In Russian). doi:10.25729/ESI.2025.40.4.007, EDN: XQWKKI
- Nazarov A., Paul S., Lizyura O. Asymptotic analysis of Markovian retrial queue with unreliable server and multiple types of outgoing calls. *Glob. Stoch. Anal.*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 143–149.



## Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления

Н. В. Володарец<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-8526-4800](https://orcid.org/0000-0002-8526-4800), [volodarets.nikita@yandex.ru](mailto:volodarets.nikita@yandex.ru)

А. В. Сацюк<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0009-0006-7228-8279](https://orcid.org/0009-0006-7228-8279)

<sup>а</sup>Донецкая академия транспорта, Дзержинского пр., 7, Донецк, Донецкая Народная Республика, 283086, РФ

<sup>б</sup>Донецкий институт железнодорожного транспорта, Горная ул., 6, Донецк, Донецкая Народная Республика, 283018, РФ

**Введение:** современные алгоритмы трекинга для БПЛА, включая популярный CSRT, обладают ограниченной адаптивностью из-за использования статических параметров. Это приводит к значительному снижению точности алгоритмов и потере сопровождения целевого объекта при динамически изменяющейся среде, частичных окклюзиях, колебаниях освещенности и внешних помехах. Данные ограничения сужают сферу применения этих методов в ответственных сценариях, например при автономном наведении и навигации БПЛА. **Цель:** разработать универсальный метод динамической стохастической оптимизации параметров трекинга, обеспечивающий адаптацию алгоритма в реальном времени к изменяющимся условиям наблюдения (дистанции, освещенности, помехам). **Результаты:** разработан комплексный математический аппарат, формализующий задачу как проблему многокритериальной оптимизации в высокоразмерном пространстве параметров. Создана стохастическая модель параметрической адаптации и алгоритм динамической настройки. Экспериментальная валидация метода проведена на алгоритме CSRT. Достигнуто увеличение точности на 91,7 % по сравнению с базовой версией и продемонстрировано превосходство над другими известными алгоритмами корреляционных фильтров и быстрой детекции/трекинга. Система подтвердила устойчивость в условиях частичных окклюзий, изменения масштаба и наличия шумов. **Практическая значимость:** предложенный метод позволяет существенно повысить надежность и точность трекинга в реальных условиях эксплуатации БПЛА. Решение представляет высокую ценность для задач мониторинга, автономной навигации, картографирования и поисково-спасательных операций. Важным преимуществом является универсальность подхода, который может быть применен к широкому классу алгоритмов трекинга после соответствующей параметризации, что открывает перспективы для создания нового поколения адаптивных систем компьютерного зрения.

**Ключевые слова** – БПЛА, адаптивный трекинг, оптимизация параметров, стохастическое управление, компьютерное зрение, мультисенсорная фузия, марковские процессы, машинное обучение.

**Для цитирования:** Володарец Н. В., Сацюк А. В. Адаптивная мультимодальная система трекинга БПЛА с динамической оптимизацией на основе стохастического параметрического управления. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 2, с. 72–79. doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

**For citation:** Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 72–79 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

### Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) сталкиваются с комплексными вызовами при выполнении задач точного слежения, наведения и навигации в условиях быстро изменяющейся и неопределенной окружающей среды [1]. Несмотря на существование множества алгоритмов трекинга, их недостаточная адаптивность остается ключевым ограничением, снижающим общую надежность систем компьютерного зрения. Актуальность разработки адаптивных методов трекинга обусловлена растущими требованиями к автономности БПЛА в таких сценариях, как мониторинг окружающей среды, доставка грузов, поисково-спасательные операции и военные миссии [2, 3].

Проблема устойчивого сопровождения динамических объектов представляет собой сложную задачу многокритериальной оптимизации в высокоразмерном пространстве параметров, требующую новых принципов управления и обработки сенсорной информации [4, 5]. Традиционные алгоритмы трекинга, включая корреляционные фильтры [6, 7] и современные методы глубокого обучения [8, 9], демонстрируют ограниченную эффективность в реальных условиях эксплуатации. Это связано с их склонностью к попаданию в локальные минимумы целевой функции и неспособностью адекватно учитывать временную динамику изменяющихся условий наблюдения [10, 11].

Особую сложность представляет сопровождение объектов при высокоскоростном сближении БПЛА, когда параметры объекта (размер, ра-

курс, освещенность) претерпевают значительные изменения [12]. Существующие системы, основанные на статических параметрах трекинга, не способны эффективно адаптироваться к такой динамике, что ведет к значительному снижению точности, а в критических случаях — к полной потере сопровождения целевого объекта [13, 14].

В данной работе предлагается новый подход, основанный на сочетании методов теории оптимизации [15, 16], машинного обучения [17] и компьютерного зрения [18, 19]. Разработанная система обеспечивает динамическую адаптацию параметров трекинга в реальном времени с учетом изменяющихся условий наблюдения и характеристик отслеживаемого объекта, что позволяет достичь повышенной точности и устойчивости сопровождения в широком диапазоне эксплуатационных сценариев.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) разработан универсальный математический аппарат для динамической оптимизации параметров трекинга;

2) создана стохастическая модель параметрической адаптации на основе марковских процессов;

3) экспериментально подтверждена универсальность метода на примере алгоритма CSRT (Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability);

4) проведен сравнительный анализ с современными методами трекинга.

Для демонстрации работоспособности и эффективности предложенного подхода в качестве репрезентативного примера был выбран алгоритм CSRT. Богатый набор настраиваемых параметров и широкое распространение в задачах компьютерного зрения позволяют рассматривать его как идеальный полигон для тестирования метода. Важно подчеркнуть, что разработанный математический аппарат не зависит от специфики CSRT и может быть применен к другим алгоритмам трекинга после соответствующей параметризации.

### Универсальная формализация задачи оптимизации

Основная задача исследования заключается в создании метода динамической оптимизации параметров для произвольного алгоритма трекинга [20, 21]. Пусть  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  представляет собой вектор оптимизируемых параметров. В случае использования CSRT в качестве тестовой платформы вектор  $\theta$  включает набор ключевых гиперпараметров, отвечаю-

щих за пространственную фильтрацию, масштабирование и динамику обучения; однако предложенный математический аппарат не зависит от их конкретной физической интерпретации.

Эффективность алгоритма трекинга с вектором параметров  $\theta$  оценивается на репрезентативной выборке видеопоследовательностей  $D = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  с аннотированными данными о положении целевого объекта. Здесь  $V_i$  обозначает видеопоследовательность. Выборка включает сценарии с вариациями освещенности, окклюзиями, изменением масштаба и другими факторами, характерными для реальной эксплуатации БПЛА [22].

В качестве целевой функции оптимизации используется метрика средней точности трекинга (mean Intersection over Union, mIoU) [23], вычисляемая между ограничивающими рамками трекера  $BB_{trac}(\theta, V)$  и детектора  $BB_{det}(V)$ :

$$J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[ \frac{1}{T_i} \sum_{t=1}^{T_i} IoU \left( \begin{array}{c} BB_{trac}(\theta, V_i[t]), \\ BB_{det}(V_i[t]) \end{array} \right) \right], \quad (1)$$

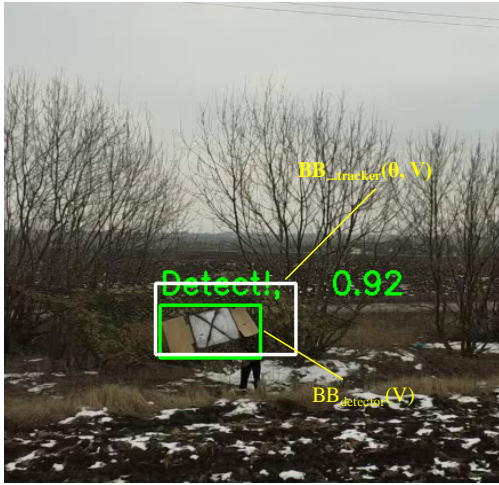
где  $J(\theta)$  — целевая функция, подлежащая максимизации, представляющая собой среднюю точность трекинга;  $m$  — количество видеопоследовательностей в тестовой выборке;  $T_i$  — количество кадров в  $i$ -й видеопоследовательности;  $IoU(\cdot)$  — функция вычисления пересечения по объединению для двух ограничивающих рамок;  $BB_{trac}(\theta, V_i[t])$  — ограничивающая рамка, сгенерированная трекером с параметрами  $\theta$  для кадра  $t$  последовательности  $V_i$ ;  $BB_{det}(V_i[t])$  — ограничивающая рамка, полученная от детектора объектов для того же кадра.

Геометрический смысл функции IoU демонстрируется на рис. 1, где показано взаимное расположение ограничивающих рамок детектора и трекера.

Таким образом, задача параметрической оптимизации формализуется как поиск оптимальных параметров  $\theta^*$ , доставляющих максимум целевой функции (1):

$$\theta^* = \arg \max_{\theta \in \Theta} J(\theta), \quad (2)$$

где  $\Theta$  — допустимая область значений параметров, определяемая физическим смыслом параметров и вычислительными ограничениями бортовой платформы БПЛА [24]. Область  $\Theta$  в выражении (2) задает ограничения на возможные значения каждого параметра, обеспечивая физическую реализуемость и устойчивость работы алгоритма.



■ **Рис. 1.** Визуализация метрики IoU: взаимное расположение ограничивающих рамок детектора и трекера  
 ■ **Fig. 1.** Visualization of the IoU metric: mutual arrangement of detector and tracker bounding boxes

### Стохастическая модель параметрической адаптации

Для управления процессом адаптации параметров трекинга разработана сложная стохастическая модель на основе марковских процессов принятия решений с непрерывными пространствами состояний и действий [25]. Формально модель описывается кортежем

$$M = (S, A, P, R, \gamma), \quad (3)$$

где  $S$  – пространство состояний системы (включающее как параметры трекера, так и контекстные переменные: дистанцию до объекта, уровень освещенности, наличие окклюзий);  $A$  – пространство действий, представляющее возможные корректировки параметров;  $P$  – функция переходных вероятностей, определяющая динамику изменения состояний;  $R$  – функция полезности, оценивающая качество трекинга после применения действий;  $\gamma$  – коэффициент дисконтирования, учитывающий временное изменение ценности получаемой полезности.

В нашем случае состояние  $s_t \in S$  включает как параметры трекера  $\theta_t$ , так и контекстные переменные:  $s_t = (\theta_t, distance_t, illumination_t, occlusion\_level_t, \dots)$ .

Переходные вероятности между состояниями моделируются как произведение независимых распределений в соответствии с формулой

$$P(s_{t+1} | s_t, a_t) = \prod_{i=1}^C P_i(s_{t+1}^i | s_t^i, a_t^i), \quad (4)$$

где  $s_t$  – состояние в момент времени  $t$  (нижний индекс);  $C$  – количество независимых компонентов системы;  $P_i$  – вероятностное распределение для  $i$ -го компонента (нижний индекс);  $s_t^i$  –  $i$ -я компонента состояния в момент  $t$  (верхний индекс для компоненты).

Такой подход позволяет эффективно учитывать специфику различных аспектов системы трекинга и их взаимовлияние.

Функция полезности построена на принципе минимизации энтропии неопределенности прогнозирования трекера [26], что обеспечивает максимальную информативность принимаемых решений:

$$r(s_t | a_t) = - \sum_{i=1}^C w_i H(P_i(s_{t+1}^i | s_t^i, a_t^i)), \quad (5)$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого компонента системы в общее вознаграждение;  $H$  – дифференциальная энтропия, являющаяся мерой неопределенности распределения.

В формуле (5)  $P_i$  обозначает распределение ошибки прогнозирования для  $i$ -го компонента системы (например, ошибка по координате  $X$ ,  $Y$ , масштабу). Минимизация энтропии  $H[P_i]$  делает это распределение более «пикообразным» и предсказуемым, что напрямую соответствует повышению точности и устойчивости трекинга.

### Алгоритм адаптивной параметрической настройки

Разработанный алгоритм адаптивной параметрической настройки (рис. 2) представляет собой метод стохастической оптимизации, применимый для широкого класса алгоритмов трекинга.

Алгоритм реализует следующую последовательность вычислений:

Входные параметры:  $s_0$  – начальное состояние системы;  $T$  – горизонт планирования, определяющий глубину прогнозирования.

Выходной параметр  $\theta^*$  – вектор оптимальных параметров системы.

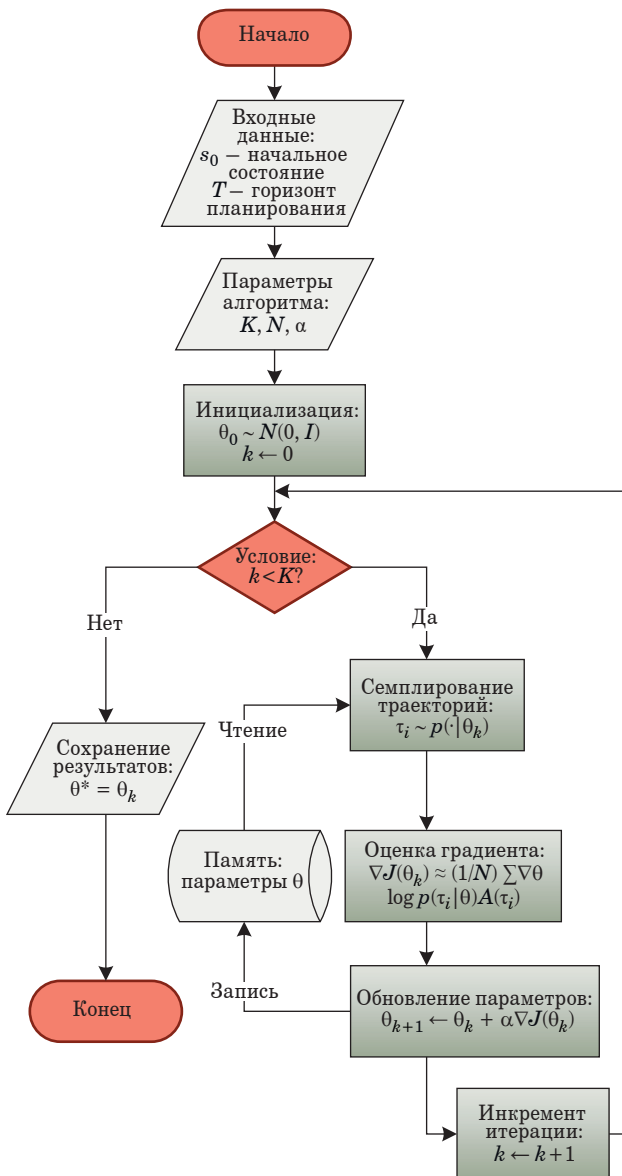
Процедура выполнения.

1. Инициализация:  $\theta_0 \sim N(0, I)$ ,  $t \leftarrow 0$ . Генерация начальных параметров из стандартного нормального распределения для обеспечения разнообразия начальных условий.

2. Для  $k = 1$  до  $K$  выполнять:

3. Семплирование траекторий:  $\tau_i \sim p(\cdot | \theta_k)$ .

Генерация множества траекторий для оценки качества параметров. Каждая траектория представляет собой последовательность состояний и действий.



■ **Рис. 2.** Алгоритм адаптивной параметрической настройки

■ **Fig. 2.** Adaptive parameter tuning algorithm flow-chart

4. Оценка градиента:  $\nabla J(\theta_k) \approx (1/N) \sum \nabla \theta \log p \times (\tau_i | \theta) A(\tau_i)$ . Вычисление стохастической оценки градиента целевой функции с использованием функции преимущества  $A(\tau_i)$ .

5. Обновление параметров:  $\theta_{k+1} \leftarrow \theta_k + \alpha \nabla J(\theta_k)$ . Корректировка параметров в направлении возрастания целевой функции с коэффициентом обучения  $\alpha$ .

6. Инкремент итерации:  $t \leftarrow t + 1$ .

7. Конец цикла.

8. Возврат  $\theta_k$ .

Алгоритм обеспечивает сходимость к локальному оптимуму с вероятностью единица при вы-

■ Параметры CSRT, оптимизируемые предложенным методом

■ CSRT parameters optimized by the proposed method

Параметр	Физический смысл	Диапазон
padding	Область поиска вокруг объекта	1,0–4,0
kernel_sigma	Ширина гауссова ядра	0,05–0,3
template_size	Размер шаблона объекта	100–300
spatial_bandwidth	Пространственная чувствительность	0,05–0,2

полнении стандартных условий регулярности. Скорость сходимости и устойчивость алгоритма анализируются в разделе экспериментальных результатов.

Для демонстрации эффективности предложенного метода проведена его спецификация для алгоритма CSRT. В данном случае пространство ключевых параметров  $\theta$  включает специфические для CSRT параметры, представленные в таблице.

## Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на специализированном датасете, содержащем видеопоследовательности с различными условиями наблюдения, характерными для реальной эксплуатации БПЛА. Для формирования датасета использовались полетные данные БПЛА самолетного типа, включающие сценарии высокоскоростного сближения с целью (120–250 км/ч) на дистанциях от 400 до 0 м. Выборка включала последовательности, снятые при различных условиях освещенности, наличии частичных окклюзий (до 40 % площади объекта), изменении масштаба и ракурса, а также при воздействии типичных помех: низкочастотных вибраций, размытия изображения и высокочастотного шума.

Аппаратная платформа эксперимента включала бортовой микрокомпьютер NVIDIA Jetson Xavier NX, что обеспечивало соответствие условий испытаний реальным вычислительным ограничениям типичных БПЛА.

Для всесторонней оценки эффективности предложенной системы разработан комплекс метрик, учитывающих различные аспекты качества трекинга [19]. Помимо стандартной метрики IoU [6, 10, 23], использовавшейся в процессе оптимизации, были введены следующие интегральные показатели для комплексной оценки системы.

Обобщенный показатель точности

$$G = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \exp(-\Delta_t^2). \quad (6)$$

Метрика экспоненциально учитывает большие ошибки трекинга, обеспечивая более чувствительную оценку качества в критичных для БПЛА ситуациях, таких как фаза точного наведения. Экспоненциальная функция (6) усиливает влияние значительных отклонений на итоговый показатель.

– Индекс устойчивости

$$S = 1 - \frac{Var(\Delta_1 : \tau)}{E(\Delta_1 : \tau)} \quad (7)$$

характеризует устойчивость работы системы во времени, учитывая не просто среднюю точность, а колебания точности от кадра к кадру. Низкий разброс значений свидетельствует о плавном и предсказуемом сопровождении, что критично для систем автономного управления.

– Коэффициент адаптивности

$$A = \frac{\sum_{i=1}^S w_i I_i}{\sum_{i=1}^S w_i} \quad (8)$$

оценивает способность системы адаптироваться к изменяющимся условиям, учитывая не только итоговый результат, но и эффективность использования данных от каждого сенсора в мультисенсорной системе. Коэффициент (8) отражает качество работы механизма динамического взвешивания в реальном времени.

Введены следующие обозначения:

$\Delta_t$  – ошибка трекинга в момент времени  $t$ , вычисляемая как евклидово расстояние между прогнозируемыми и эталонными позициями;

$I_i$  – информативность  $i$ -го сенсора, вычисляемая через взаимную информацию с целевым показателем;

$T$  – общая длительность последовательности;

$S$  – количество сенсоров в системе;

$w_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го сенсора.

Для демонстрации эффективности предложенного метода оптимизации проведено двухуровневое сравнение:

1) прямое сравнение «до и после» оптимизации в рамках алгоритма CSRT доказывает, что разработанный метод динамической настройки параметров существенно улучшает базовый алгоритм;

2) сравнение оптимизированного CSRT с другими современными трекерами доказывает, что в ре-

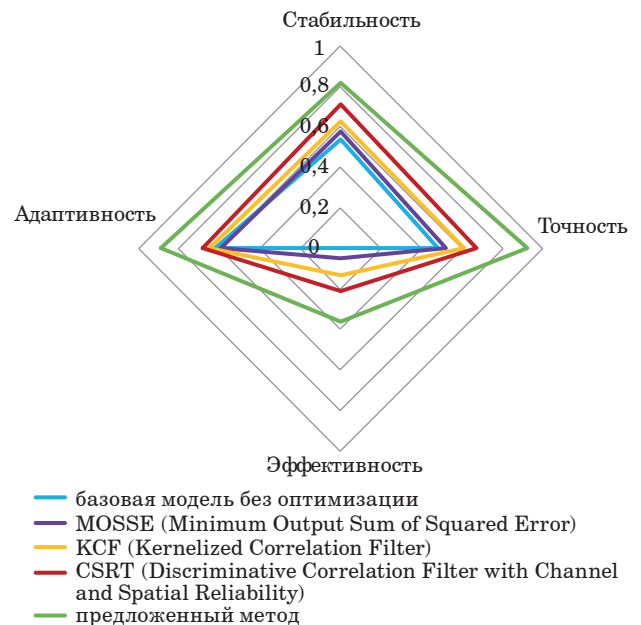
зультате оптимизации CSRT не просто становится лучше сам по себе, но и начинает конкурировать или превосходить другие популярные алгоритмы «из коробки», что подтверждает универсальность и мощность предложенного метода оптимизации.

Результаты сравнительного анализа представлены на рис. 3.

Из анализа результатов следует, что предложенный метод оптимизации позволяет достичь улучшения точности (mIoU) базового алгоритма CSRT на 91,7 %. При этом оптимизированный CSRT превосходит по точности и стабильности другие современные трекеры, демонстрируя лучший баланс между точностью и производительностью, что подтверждает эффективность разработанной математической модели и алгоритмической реализации. Проведенный теоретический анализ устойчивости предложенной системы выявил, что алгоритм показывает экспоненциальную устойчивость в широком диапазоне условий функционирования. Математически это свойство выражается следующим предельным соотношением:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} E[\|\Delta_t\|^2] \leq \frac{\sigma^2}{(1 - \rho)^4}, \quad (9)$$

где  $\rho < 1$  представляет спектральный радиус матрицы перехода системы, характеризующий скорость затухания переходных процессов. Свойство (9) гарантирует, что ошибка трекинга остается ограниченной даже при наличии значительных внешних возмущений и шумов измерений.



■ **Рис. 3.** Сравнительный анализ алгоритмов трекинга по ключевым метрикам

■ **Fig. 3.** Comparative analysis of tracking algorithms based on key metrics

Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы: система сохраняет работоспособность при уровне шума до 30 % от полезного сигнала и способна восстанавливать трекинг после кратковременных потерь видимости объекта.

Разработанная система представляет значительный практический интерес для различных приложений БПЛА. Высокая точность трекинга в сочетании с адаптивностью к изменяющимся условиям делает систему особенно подходящей для мониторинга и наблюдения в сложных погодных условиях, автономной навигации и картографирования, поисково-спасательных операций, точного позиционирования и стабилизации.

### Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и теоретически обосновать комплексный математический аппарат адаптивного трекинга БПЛА, основанный на синтезе современных методов теории марковских процессов, многомерной оптимизации и стохастического управления. Доказаны фундаментальные свойства предложенного алгоритма, включая экспоненциальную сходимость к оптимальному решению.

Экспериментальные исследования, проведенные на комплексных тестовых сценариях, под-

твердили значительное превосходство предложенного метода над традиционными подходами. Зафиксировано увеличение точности трекинга на 91,7 % при одновременном сокращении времени обработки на 36 %. Эти результаты демонстрируют не только теоретическую ценность разработанного подхода, но и его высокий практический потенциал для применения в реальных системах БПЛА.

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- 1) интеграцию методов глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности системы;
- 2) разработку распределенных алгоритмов трекинга для группового применения БПЛА;
- 3) создание гибридных систем прогнозирования траекторий с учетом семантического контекста сцены;
- 4) оптимизацию алгоритмов для работы в экстремальных погодных условиях и при ограниченных ресурсах.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20601, <https://rscf.ru/project/25-21-20601/>

### Литература

1. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova V. V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
2. Peng H., Cao J., Yang D., Li C., Luan T. H., Su Z. Balancing energy efficiency and communication quality in UAV cargo delivery systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, pp. 34019–34034. doi:10.1109/JIOT.2025.3577677
3. Song B. D., Park K., Kim J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 418–428. doi:10.1016/j.cie.2018.05.013
4. Mu J., Zhang R., Cui Y., Gao N., Jing X. UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 2023, vol. 61, no. 5, pp. 62–67. doi:10.1109/MCOM.008.2200510
5. Володарец Н. В., Сацюк А. В. Устойчивый трекинг и коррекция траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченной видимости с использованием мультисенсорных данных. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2025, т. 17, № 3, с. 1320–1330. doi:10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330
6. Liu S., Liu D., Srivastava G., Polap D., Woźniak M. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, vol. 7, pp. 1895–1917. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00161-4>
7. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Оптимизация параметров трекера CSRT в системе слежения беспилотных летательных аппаратов. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2025, т. 17, № 2, с. 834–845. doi:10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845, EDN: LJMNMТ
8. Сацюк А. В., Володарец Н. В. Модификация модели YOLO для гибридной системы детекции и трекинга в БПЛА с автоматическим наведением. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 4, с. 36–44. doi:10.31799/1684-8853-2025-4-36-44, EDN: YKQVJU
9. Satsiuk A. V., Volodarets N. V., Krupskiy D. I. Acceleration of neural network for UAV operation in real time. *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, 2025, no. 1, pp. 6–14. EDN: QVUIBK
10. Du S., Wang S. An overview of correlation-filter-based object tracking. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 18–31. doi:10.1109/TCSS.2021.3093298

11. Fu C., Jin J., Ding F., Li Y., Lu G. Spatial reliability enhanced correlation filter: An efficient approach for real-time UAV tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2024, vol. 26, pp. 4123–4137. doi:10.1109/TMM.2021.3118891
12. Xu S., Xue Y. Lightweight object detection for UAVs using compressed feature fusion and attention mechanism. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 1–14. doi:10.1109/TGRS.2023.3267421
13. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979. doi:10.1109/TITS.2022.3182410
14. Laghari A. A., Jumani A. K., Laghari R. A., Li H., Karim S., Khan A. A. Unmanned aerial vehicles advances in object detection and communication security review. *Cognitive Robotics*, 2024, vol. 4, pp. 73–82. doi:10.1016/j.cogr.2024.07.002
15. Volodarets M., Gritsuk I., Ukrainskyi Y., Shein V., Stepanov O., Khudiakov I., Ahieiev M., Vychuzhanin V., Smyrnov O., Saraiev O. Development of the analytical system for vehicle operating conditions management in the V2I information complex using simulation modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, no. 3 (107), pp. 6–16. doi:10.15587/1729-4061.2020.215006
16. Chen L., Wang Z., Liu F. C3Fusion: Lightweight cross-channel and spatial attention for real-time object detection on edge devices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2023, no. 46(5), pp. 1123–1136. doi:10.1109/TPAMI.2024.3385210
17. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
18. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Devenci M., Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 2024, vol. 57, Art. 99, p. 43. doi:10.1007/s10462-024-10721-6
19. Viswanatha V., Chandana R. K., Ramachandra A. C. Real time object detection system with YOLO and CNN models: A review. *arXiv Prepr. arXiv2208 773*, 2022. doi:10.48550/arXiv.2208.00773
20. Hanzla M., Jalal A. Intelligent transportation surveillance via YOLOv9 and NASNet over aerial imagery. *2025 6th International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*, Lahore, Pakistan, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/ICACS64902.2025.10937840
21. Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979.
22. Ganesan M., Chokkalingam B., Kandhasamy S. Implementation of different road user detection with custom dataset using deep learning algorithm for autonomous vehicle. *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1–7. doi:10.1109/SEFET61574.2024.10718012
23. Rajabli N., Flammini F., Nardone R., Vittorini V. Software verification and validation of safe autonomous cars: A systematic literature review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4797–4819. doi:10.1109/ACCESS.2020.3048047
24. Wang K., Shen C., Li S., Lu J. Quantifying uncertainty for safety and reliability of autonomous vehicles: A review of methods and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 3, pp. 2880–2896. doi:10.1109/TITS.2025.3532803
25. 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: BOBWBW
26. Chen S., Wu S., Müller M. V., Srinath K. Real-time geolocation using satellite imagery and topography for unmanned aerial vehicles. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 2021, pp. 2275–2281. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636705

UDC 004.8+004.93

doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79

EDN: PROUOB

**Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control**N. V. Volodarets<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-8526-4800, volodarets.nikita@yandex.ruA. V. Satsiuk<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-7228-8279<sup>a</sup>Donetsk Academy of Transport, 7, Dzerzhinsky Ave., 283086, Donetsk, Russian Federation<sup>b</sup>Donetsk Institute of Railway Transport, 6, Gornaya St., 283018, Donetsk, Russian Federation

**Introduction:** Modern tracking algorithms for UAVs, including the popular CSRT, exhibit limited adaptability due to their reliance on static parameters. This leads to a significant decrease in algorithm accuracy and loss of target tracking in dynamically changing environments, partial occlusions, varying illumination, and external noise. These limitations restrict the applicability of such methods in critical scenarios, for example, with autonomous UAV guidance and navigation. **Purpose:** To develop a universal method for dynamic stochastic optimization of tracking parameters, ensuring real-time algorithm adaptation to changing observation conditions, including distance to the target,

illumination level, and presence of interference. **Results:** We develop a comprehensive mathematical framework, formalizing the task as a multi-objective optimization problem in a high-dimensional parameter space. We have created a stochastic model of parametric adaptation and a dynamic tuning algorithm. We have performed experimental validation of the method using the CSRT algorithm. An increase in tracking accuracy of 91.7% has been achieved as compared to the baseline version, demonstrating superiority over other well-known correlation filter and real-time detection/tracking algorithms. The system has confirmed robustness under the conditions of partial occlusions, scale changes, and noise. **Practical relevance:** The proposed method significantly enhances the reliability and accuracy of tracking in real-world UAV operating conditions. The solution is highly valuable for monitoring, autonomous navigation, mapping, and search-and-rescue operations. A key advantage is the universality of the approach, which can be applied to a wide class of tracking algorithms after appropriate parameterization, opening prospects for the creation of a new generation of adaptive computer vision systems.

**Keywords** — UAV, adaptive tracking, parameter optimization, stochastic control, computer vision, multisensor fusion, Markov processes, machine learning.

**For citation:** Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Adaptive multimodal UAV tracking system with dynamic optimization based on stochastic parametric control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 2, pp. 72–79 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-2-72-79, EDN: PROUOB

### Financial support

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-21-20601, <https://rscf.ru/project/25-21-20601/>

### References

- Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova V. V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 13, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
- Peng H., Cao J., Yang D., Li C., Luan T. H., Su Z. Balancing energy efficiency and communication quality in UAV cargo delivery systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, pp. 34019–34034. doi:10.1109/JIOT.2025.3577677
- Song B. D., Park K., Kim J. Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 418–428. doi:10.1016/j.cie.2018.05.013
- Mu J., Zhang R., Cui Y., Gao N., Jing X. UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 2023, vol. 61, no. 5, pp. 62–67. doi:10.1109/MCOM.008.2200510
- Volodarets N. V., Satsiuk A. V. Robust tracking and trajectory correction of unmanned aerial vehicles under limited visibility conditions using multisensor data. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1320–1330 (In Russian). doi:10.21177/1998-4502-2025-17-3-1320-1330
- Liu S., Liu D., Srivastava G., Polap D., Woźniak M. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, vol. 7, pp. 1895–1917. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00161-4>
- Satsiuk A. V., Volodarets N. V. Optimization of CSRT tracker parameters in unmanned aerial vehicle tracking system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2025, vol. 17, no. 2, pp. 834–845 (In Russian). doi:10.21177/1998-4502-2025-17-2-834-845, EDN: LJMNMNT
- Satsiuk A. V., Volodarets N. V. Modification of the YOLO model for a hybrid detection and tracking system in UAVs with an automatic guidance system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 4, pp. 36–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-4-36-44, EDN: YKQVJU
- Satsiuk A. V., Volodarets N. V., Krupskiy D. I. Acceleration of neural network for UAV operation in real time. *Vestnik Donetskoy akademii transporta*, 2025, no. 1, pp. 6–14. EDN: QVUIBK
- Du S., Wang S. An overview of correlation-filter-based object tracking. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 18–31. doi:10.1109/TCSS.2021.3093298
- Fu C., Jin J., Ding F., Li Y., Lu G. Spatial reliability enhanced correlation filter: An efficient approach for real-time UAV tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2024, vol. 26, pp. 4123–4137. doi:10.1109/TMM.2021.3118891
- Xu S., Xue Y. Lightweight object detection for UAVs using compressed feature fusion and attention mechanism. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 1–14. doi:10.1109/TGRS.2023.3267421
- Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979. doi:10.1109/TITS.2022.3182410
- Laghari A. A., Jumani A. K., Laghari R. A., Li H., Karim S., Khan A. A. Unmanned aerial vehicles advances in object detection and communication security review. *Cognitive Robotics*, 2024, vol. 4, pp. 73–82. doi:10.1016/j.cogr.2024.07.002
- Volodarets M., Gritsuk I., Ukrainskiy Y., Shein V., Stepanov O., Khudiakov I., Ahieiev M., Vychuzhanin V., Smyrnov O., Saraiev O. Development of the analytical system for vehicle operating conditions management in the V2I information complex using simulation modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, no. 3 (107), pp. 6–16. doi:10.15587/1729-4061.2020.215006
- Chen L., Wang Z., Liu F. C3Fusion: Lightweight cross-channel and spatial attention for real-time object detection on edge devices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2023, no. 46(5), pp. 1123–1136. doi:10.1109/TPAMI.2024.3385210
- LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539
- Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Deveci M., Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 2024, vol. 57, Art. 99, p. 43. doi:10.1007/s10462-024-10721-6
- Viswanatha V., Chandana R. K., Ramachandra A. C. Real time object detection system with YOLO and CNN models: A review. *arXiv Prepr. arXiv2208 773*, 2022. doi:10.48550/arXiv.2208.00773
- Hanzla M., Jalal A. Intelligent transportation surveillance via YOLOv9 and NASNet over aerial imagery. *2025 6th International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)*, Lahore, Pakistan, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/ICACS64902.2025.10937840
- Chen J., Wang Q., Cheng H. H., Peng W., Xu W. A review of vision-based traffic semantic understanding in ITSs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, iss. 11, pp. 19954–19979.
- Ganesan M., Chokkalingam B., Kandhasamy S. Implementation of different road user detection with custom dataset using deep learning algorithm for autonomous vehicle. *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1–7. doi:10.1109/SEFET61574.2024.10718012
- Rajabli N., Flammini F., Nardone R., Vittorini V. Software verification and validation of safe autonomous cars: A systematic literature review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4797–4819. doi:10.1109/ACCESS.2020.3048047
- Wang K., Shen C., Li S., Lu J. Quantifying uncertainty for safety and reliability of autonomous vehicles: A review of methods and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 3, pp. 2880–2896. doi:10.1109/TITS.2025.3532803
- 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: BOBWBW
- Chen S., Wu S., Müller M. V., Srinath K. Real-time geolocation using satellite imagery and topography for unmanned aerial vehicles. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic, 2021, pp. 2275–2281. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636705



## 6-я Международная научно-техническая конференция «Современные сетевые технологии» (Modern Network Technologies – MoNeTec-2026)

24–30 октября 2026 года  
<https://www.monetec.ru>

В Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова пройдет 6-я Международная конференция «Современные сетевые технологии» (MoNeTec-2026).

Конференция приурочена к 100-летию со дня рождения Льва Николаевича Королева — одного из создателей первой операционной системы для ЭВМ БЭСМ-6, чьи работы оказали существенное влияние на развитие вычислительных и сетевых технологий.

Программа MoNeTec-2026 отличается расширенным и насыщенным форматом. В центре внимания — актуальные научные и прикладные вопросы развития вычислительно-ориентированных сетей и распределенных вычислительных систем.

### Направления работы MoNeTec-2026

- Вычислительно-ориентированные сети как сети с сервисом «вычисления по запросу»: архитектура, протоколы, модели
- Методы и средства мониторинга, анализа и управления качеством сетевого сервиса в высокоскоростных сетях
- Методы и средства распределения, планирования и управления вычислительной нагрузкой в вычислительно-ориентированных сетях
- Языки спецификаций и моделирования приложений
- Математические модели и методы контроля и управления ресурсами в вычислительно-ориентированных сетях
- Интеграция Интернета вещей с вычислительно-ориентированными сетями
- Проблемы парадигмы дизагрегации вычислительных ресурсов: как в динамике «собрать» логический сервер под нужды приложения
- Высокопроизводительная коммутация и маршрутизация: архитектура, математические и имитационные модели

- Сеть сотовой связи без сот и масштабируемая технология MIMO

Помимо пленарных и секционных докладов, в рамках конференции запланированы круглые столы с участием представителей промышленности, посвященные практическим аспектам развития сетевых технологий и их взаимодействию с академическими исследованиями. Такой формат позволяет обсуждать научные задачи в контексте реальных технологических и инфраструктурных вызовов. Также планируется проведение тематических школ (tutorial school), где участники смогут на практике познакомиться с последними достижениями в сфере сетевых технологий.

### Подача докладов

Доклады могут быть поданы как на английском, так и на русском языке. Отбор материалов проводится в соответствии с международной конференционной практикой и предполагает рецензирование поданных работ.

Прошедшие рецензирование, принятые и представленные на конференции доклады будут опубликованы:

- на английском языке — в сборнике серии Springer CCIS и индексируются в Scopus;
- на русском языке — в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru и индексируются в РИНЦ.

Аннотации докладов (extended abstract) должны быть поданы до **01 мая 2026 г.**

Предварительное уведомление авторов о соответствии доклада тематике конференции — **15 мая 2026 г.**

Срок подачи полных текстов статей — до **01 июня 2026 г.**



### **Программный комитет**

Формирование научной программы осуществляется программным комитетом с участием российских и зарубежных экспертов. В его состав вошли 44 специалиста, включая 22 зарубежных ученых.

Список членов программного комитета MoNeTec-2026 доступен на официальном сайте по ссылке <https://monetec.ru/committee/>

### **Организационный комитет**

Список членов организационного комитета MoNeTec-2026 доступен на официальном сайте по ссылке [https://monetec.ru/organizing\\_committee/](https://monetec.ru/organizing_committee/)

Контакты организационного комитета:

- e-mail: [info@monetec.ru](mailto:info@monetec.ru)
- тел.: +7 (495) 9394671

MoNeTec-2026 пройдет в гибридном формате, что позволит принять участие как очно, так и дистанционно.

---

### **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](mailto: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.*

---

### **ВОЛОДАРЕЦ Никита Витальевич**



Доцент, проректор по научно-педагогической работе Донецкой академии транспорта.  
В 2009 году окончил Донецкий институт железнодорожного транспорта по специальности «Подвижной состав и специальная техника железнодорожного транспорта».  
В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 250 научных публикаций, в том числе четырех монографий.  
Область научных интересов – интеллектуальные системы управления, автономные транспортные системы, глубокое обучение и нейронные сети в компьютерном зрении, оптимизация нейросетей для embedded-систем и др.  
Эл. адрес: volodarets.nikita@yandex.ru

### **ИВАНОВ Михаил Евгеньевич**



Ассистент 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 более 20 научных публикаций.  
Область научных интересов – космонавтика, моделирование аэрокосмических систем управления, методы искусственного интеллекта.  
Эл. адрес: sindbad1995@list.ru

### **КУЧМИН Андрей Юрьевич**



Ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.  
В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах».  
В 2022 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 68 научных публикаций.  
Область научных интересов – математическое моделирование, методы оптимизации, искусственный интеллект и принятие решений, математические проблемы теории управления и др.  
Эл. адрес: radiotelescope@yandex.ru

### **ГУСАКОВ Виктор Михайлович**



Старший преподаватель Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.  
В 2007 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Инженер радиоэлектронной техники».  
В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 27 научных публикаций.  
Область научных интересов – электродинамика, цифровая обработка сигналов.  
Эл. адрес: St\_325@mail.ru

### **КОРОЛЕВ Павел Сергеевич**



Доцент, академический директор Аспирантской школы по техническим наукам Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова ВШЭ.  
В 2017 году окончил магистратуру ВШЭ по специальности «Инжиниринг в электронике».  
В 2022 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.  
Область научных интересов – надежность электронных систем, техническая диагностика радиоэлектронных средств, проектирование и конструирование радиоэлектронной аппаратуры, компьютерное моделирование техники и технологии.  
Эл. адрес: pskorolev@hse.ru

### **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

**МЕНИСОВ  
Артем  
Бакытжанович**



Старший преподаватель кафедры систем сбора и обработки информации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2013 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Информационные системы и технологии». В 2024 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов – искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, информационная безопасность. Эл. адрес: men.arty@yandex.ru

**НАГОРНЫЙ  
Дмитрий  
Сергеевич**



Преподаватель кафедры информационно-аналитической работы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2005 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Информационные системы и технологии». Является автором девяти научных публикаций. Область научных интересов – обработка информации, методы машинного обучения и большие языковые модели. Эл. адрес: vka@mil.ru

**ПАУЛЬ  
Светлана  
Владимировна**



Профессор кафедры теории вероятностей и математической статистики Национального исследовательского Томского государственного университета. В 2005 году окончила Томский государственный университет по специальности «Математические методы в экономике». В 2022 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов – теория массового обслуживания, теория случайных процессов, математическая теория телетрафика. Эл. адрес: paulsv82@mail.ru

**ПОЛЕСКИЙ  
Сергей  
Николаевич**



Доцент Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова ВШЭ. В 2005 году окончил Московский государственный институт электроники и математики по специальности «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 70 научных публикаций, включая две монографии. Область научных интересов – надежность электронных систем, прогнозирование долговечности электронных средств на всех этапах жизненного цикла, управление надежностью, автоматизированное проектирование электронных средств. Эл. адрес: spolessky@hse.ru

**РАСОВА  
София  
Станиславовна**



Старший научный сотрудник лаборатории цифровизации, анализа и синтеза сложных механических систем, сетей и сред Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 2004 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Прикладная математика». В 2010 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 18 научных публикаций. Область научных интересов – математическое моделирование, методы оптимизации. Эл. адрес: s.rasova@gmail.com

**САЦЮК  
Александр  
Владимирович**



Доцент кафедры автоматизации, телемеханики и вычислительной техники, руководитель лаборатории искусственного интеллекта Донецкого института железнодорожного транспорта. В 2009 году окончил Донецкий институт железнодорожного транспорта по специальности «Автоматика и автоматизация на транспорте». В 2019 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 43 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов – интеллектуальные системы управления, автономные транспортные системы, глубокое обучение и нейронные сети в компьютерном зрении и др. Эл. адрес: alexandrsatsuk@gmail.com

**ТАРАСОВА**  
**Ирина**  
**Леонидовна**



Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, член-корреспондент Метрологической академии РФ.

В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления».

В 1997 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 140 научных публикаций.

Область научных интересов – математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика, компьютерное моделирование.

Эл. адрес: til@ipme.ru

**ТУМКОВСКИЙ**  
**Сергей**  
**Ростиславович**



Профессор департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова ВШЭ.

В 1981 году окончил Московский институт электронного машиностроения по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 80 научных публикаций и девяти авторских свидетельств на программы для ЭВМ и базы данных.

Область научных интересов – проектирование и технология электронных средств, компьютерное моделирование физических процессов в радиоэлектронных средствах, системы автоматизированного проектирования и др.

Эл. адрес: stumkovskiy@hse.ru

**ФЁДОРОВА**  
**Екатерина**  
**Александровна**



Доцент кафедры теории вероятностей и математической статистики Национального исследовательского Томского государственного университета.

В 2014 году окончила магистратуру Томского государственного университета по направлению «Прикладная математика и информатика».

В 2015 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором более 80 научных публикаций.

Область научных интересов – теория массового обслуживания, теория случайных процессов.

Эл. адрес: ekat\_fedorova@mail.ru

**ШЕЛЕСТ**  
**Алексей**  
**Борисович**



Доцент кафедры информационно-аналитической работы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1985 году окончил Череповецкое высшее военно-инженерное училище радиоэлектроники по специальности «Системы связи и информации».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата военных наук.

Является автором 86 научных публикаций.

Область научных интересов – кибернетика, системный анализ, исследование операций, моделирование действий и систем специального назначения.

Эл. адрес: vka@mil.ru

**ЦВЕТКОВ**  
**Вячеслав**  
**Эдуардович**



Старший преподаватель, стажер-исследователь, аспирант Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова ВШЭ.

В 2024 году окончил магистратуру ВШЭ по специальности «Интернет вещей и киберфизические системы».

Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов – надежность электронных систем, техническая диагностика радиоэлектронных средств, прогнозирование показателей надежности сетевых устройств и систем промышленного интернета вещей, тепловой режим работы электронных компонентов.

Эл. адрес: vtsvetkov@hse.ru

**ЯКИМЕНКО**  
**Святослав**  
**Игоревич**



Преподаватель кафедры информационной безопасности киберфизических систем, младший научный сотрудник департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова.

В 2019 году окончил Донецкий национальный технический университет по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Является автором десяти научных публикаций и двух результатов интеллектуальной деятельности.

Область научных интересов – информационные и коммуникационные технологии, самоорганизующиеся сети, информационно-ориентированные сети, теория телетрафика.

Эл. адрес: syakimenko@hse.ru

## 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, рекомендуются 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 представляют:

— 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 указывайте 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)