

Научная статья

УДК 004.93:621.391.53

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188276>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LRSDDL>

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ QOS И SLA В ТУМАННЫХ И ОБЛАЧНЫХ СЕГМЕНТАХ ИОТ-СЕТИ В АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ

Е.В. Глушак✉, Д.В. Мишин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Самара, Россия

✉ evglushak@yandex.ru

Цитирование: Глушак Е.В., Мишин Д.В. Оценка и управление QoS и SLA в туманных и облачных сегментах iot-сети в авиационной отрасли // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188276>

Аннотация. Данная статья посвящена разработке и исследованию математической модели управления качеством обслуживания (QoS) и соблюдением соглашений об уровне сервиса (SLA) в гибридных IoT-сетях, включающих туманные и облачные сегменты, с учётом специфики авиационной отрасли. В современных условиях цифровизации авиационных систем и широкого внедрения Интернета вещей (IoT) возникает необходимость обеспечения высокой надёжности, минимальных задержек и гарантированной пропускной способности передачи данных, что критично для безопасности и эффективности авиационных операций.

В работе предложена комплексная математическая модель, учитывающая распределённую архитектуру IoT-сети, параметры интенсивности генерации данных IoT-устройствами, вычислительные мощности туманных узлов и облачного центра, а также сетевые задержки передачи данных. Модель базируется на теории массового обслуживания (М/М/1 очередь) для оценки времени обработки пакетов и включает ограничения по ресурсам, требованиям QoS и SLA.

Целью является минимизация суммарной задержки при одновременном соблюдении заданных параметров качества и пропускной способности.

Методология исследования включает численное моделирование с использованием программных средств Python, где для пяти IoT-устройств, двух туманных узлов и облака были заданы реальные параметры нагрузки, задержек и требований QoS/SLA. На основе эвристического алгоритма распределения нагрузки определялось оптимальное обслуживание каждого устройства, что позволило оценить эффективность предложенной модели.

Результаты численного эксперимента показали значительное улучшение ключевых показателей. Среднее снижение задержек составило около 40-45%, а увеличение пропускной способности — порядка 20-30% по сравнению с отсутствием оптимизации. Все устройства удовлетворяли требованиям QoS и SLA, что подтверждает практическую применимость модели для авиационных IoT-систем.

В заключении отмечается актуальность разработанной модели для авиационной отрасли, где критически важна оперативность и надёжность обработки данных. В дальнейшем планируется расширение модели с учётом динамических изменений нагрузки, интеграция механизмов безопасности и конфиденциальности, а также разработка адаптивных алгоритмов управления в реальном времени. Экспериментальная проверка и внедрение модели в реальные авиационные системы станут важным этапом дальнейших исследований.

Представленная работа вносит значительный вклад в развитие технологий управления QoS и SLA в гибридных IoT-сетях, способствуя повышению безопасности и эффективности авиационных информационных систем.

Ключевые слова: интернет вещей; качество обслуживания; соглашение об уровне обслуживания; туманные вычисления; облачные вычисления; оптимизация; нагрузка.

ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF QOS AND SLA IN FOG AND CLOUD SEGMENTS OF THE IOT NETWORK IN THE AVIATION INDUSTRY

E.V. Glushak✉, D.V. Mishin

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

✉ evglushak@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to the development and research of a mathematical model of quality of service (QoS) management and compliance with service level agreements (SLAs) in hybrid IoT networks, including fog and cloud segments, taking into account the specifics of the aviation industry. In modern conditions of digitalization of aviation systems and widespread adoption of the Internet of Things (IoT), there is a need to ensure high reliability, minimal delays and guaranteed data transmission capacity, which is critical for the safety and efficiency of aviation operations. The paper proposes a complex mathematical model that takes into account the distributed architecture of the IoT network, the parameters of the intensity of data generation by IoT devices, the computing power of fog nodes and a cloud center, as well as network delays in data transmission. The model is based on queuing theory (M/M/1 queue) to estimate packet processing time and includes resource constraints, QoS and SLA requirements. The goal is to minimize the total delay while maintaining the specified quality and throughput parameters.

The research methodology includes numerical modeling using Python software, where real parameters of load, delays, and QoS/SLA requirements were set for five IoT devices, two fog nodes, and a cloud. Based on a heuristic load distribution algorithm, optimal maintenance of each device was determined, which made it possible to evaluate the effectiveness of the proposed model.

The results of the numerical experiment showed a significant improvement in key indicators. The average reduction in latency was about 40-45%, and the increase in throughput was about 20-30% compared to the lack of optimization. All devices met the requirements of QoS and SLA, which confirms the practical applicability of the model for aviation IoT systems.

In conclusion, the relevance of the developed model for the aviation industry is noted, where the efficiency and reliability of data processing are critically important. In the future, it is planned to expand the model taking into account dynamic load changes, integrate security and privacy mechanisms, and develop adaptive real-time management

algorithms. Experimental verification and implementation of the model into real aviation systems will be an important stage of further research.

The presented work makes a significant contribution to the development of QoS and SLA management technologies in hybrid IoT networks, contributing to improving the safety and efficiency of aviation information systems.

Keywords: internet of things; quality of service; service level agreement; cloud computing; cloud computing; optimization, load.

Введение

Современная авиационная отрасль активно внедряет технологии Интернета вещей (IoT) для повышения безопасности, эффективности и автоматизации процессов [1]. В таких системах критически важным аспектом является обеспечение высокого качества обслуживания (QoS) и соблюдение соглашений об уровне сервиса (SLA), особенно в условиях распределённой архитектуры, включающей туманные (fog) и облачные вычислительные сегменты [2]. Туманные узлы позволяют обрабатывать данные ближе к источнику, снижая задержки и уменьшая нагрузку на облако, что особенно важно для приложений с жёсткими требованиями к времени отклика. Однако, управление QoS и SLA в таких гибридных системах представляет собой сложную задачу, требующую разработки математических моделей и алгоритмов оптимизации, способных учитывать динамическую нагрузку, ограниченные ресурсы и требования безопасности [3]. Существующие методы управления качеством обслуживания и соблюдением SLA часто не учитывают комплексную динамику взаимодействия между туманными и облачными сегментами, а также специфические требования авиационных приложений [4 – 6]. Поэтому разработка точных математических моделей и эффективных алгоритмов управления QoS и SLA в гибридных IoT-сетях является актуальной задачей, способствующей повышению надёжности, производительности и безопасности авиационных информационных систем.

Анализ существующих технологий и концепций

Современные IoT-архитектуры основаны на многослойных моделях с отдельным подключением между периферией, туманом и облаком, что позволяет

ограничивать задержку и масштабировать обработку данных [7]. Способы управления QoS в сетях IoT обычно используют приоритизацию трафика (DiffServ/TSN) и простые эвристические маршрутизации, не допуская совместной оптимизации вычислительного размещения и сетевых способов под конкретными метриками задержки и пропускной способностью [8, 9]. В туманных вычислениях применяются модели задач разгрузки, однако они также предполагают стационарные предпосылки о тенденциях и не учитывают вариативность телеметрии и сервисных запросов в последнее время [10, 11]. Методы, основанные на линейном программировании, дают точные решения, но масштабируемость ограничена при росте узлов и динамике трафика [12]. Методы обучения с подкреплением и эволюционные алгоритмы повышают масштабируемость, однако их внедрение в последние домены ограничивает необходимость гарантированного соблюдения SLA и объяснимости решений [13, 14].

В авиационной отрасли предъявляются требования к надежности, конкурентоспособности задержек и соответствию отраслевым регламентам, что делает общие облачно-периферийные решения обоснованными без доменно-ориентированных ограничений [15 – 17].

Необходима комплексная модель совместной оптимизации размещения сервисов, разгрузки и маршрутизации в гибридной IoT-сети туман-облако, способная минимизировать задержку при соблюдении пропускной способности и надежности. Требуется реализация форм в виде оптимизации задач с явными SLA-ограничениями, поддержка многокритериальности (задержка, пропускная способность, стоимость, энергопотребление) и механизма адаптации к динамической динамике. Предлагаемая в работе модель нацелена связать сетевые и вычислительные решения в единое оптимизированное ядро, гарантируя QoS/SLA для крайних сервисов и демонстрируя устойчивые выигрыши по задержке и пропускной способности на референсных схемах.

Разработка модели системы управления

Пусть $N = \{1, 2, \dots, N\}$ - множество IoT-устройств (датчиков, исполнительных модулей и т.д.),

$F = \{1, 2, \dots, F\}$ - множество туманных узлов (fog nodes),

C - облачный центр обработки данных,

λ_i - интенсивность генерации данных устройством i (пакетов/сек),

μ_f - вычислительная мощность туманного узла f (обслуживание пакетов/сек),

μ_c - вычислительная мощность облака,

$d_{i,f}$ - задержка передачи данных от устройства до туманного узла,

$d_{f,c}$ - задержка передачи данных от туманного узла до облака,

q_i - требуемый QoS для устройства i , например, максимальная допустимая задержка,

s_i - SLA-параметры для устройства i , например, минимальная пропускная способность, максимальная потеря пакетов,

$x_{i,f} \in \{0, 1\}$ - бинарная переменная, равная 1, если устройство i обслуживается туманным узлом, 0 – иначе,

$y_{i,c} \in \{0, 1\}$ - бинарная переменная, равная 1, если устройство i обслуживается облаком, 0 - иначе.

Целью разрабатываемой модели будет минимизация суммарной задержки обработки и передачи данных при соблюдении QoS и SLA, а также ограничений по ресурсам (выражение 1):

$$\min_{x,y} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{f=1}^F x_{i,f} (d_{i,f} + \omega_f) + y_{i,c} (d_{i,c} + \omega_c) \right) \quad (1)$$

где ω_f - среднее время обработки пакета в туманном узле f , ω_c - среднее время обработки пакета в облаке, $d_{i,c} = \min_f (d_{i,f} + d_{f,c})$ - задержка передачи от устройства i до облака через оптимальный туманный узел.

Рассмотрим ряд ограничений. Во-первых, пусть каждое устройство обслуживается либо одним туманным узлом, либо облаком (выражение 2):

$$\sum_{f=1}^F x_{i,f} + y_{i,c} = 1, \text{ где } \forall i \in N \quad (2)$$

Во-вторых, обозначим ограничения по вычислительным ресурсам туманных узлов (выражение 3):

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i x_{i,f} \leq \mu_f, \text{ где } \forall f \in F \quad (3)$$

И также ограничения по вычислительным ресурсам облака (неравенство 4):

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i y_{i,c} \leq \mu_c \quad (4)$$

В-третьих, соблюдение QoS (например, задержки) (5):

$$\sum_{f=1}^F x_{i,f} (d_{i,f} + \omega_f) + y_{i,c} (d_{i,c} + \omega_c) \leq q_i, \forall i \in N \quad (5)$$

А также соблюдение SLA (например, минимальная пропускная способность b_i определяется выражением 6):

$$\sum_{f=1}^F x_{i,f} b_{i,f} + y_{i,c} b_{i,c} \geq s_i, \forall i \in N, \quad (6)$$

где $b_{i,f}, b_{i,c}$ - пропускная способность, обеспечиваемая туманным узлом f и облаком для устройства i .

Реализуем модель времени обработки вида М/М/1 [18]. Данная модель помогает оценить время обработки и, соответственно, планировать распределение нагрузки между туманными и облачными узлами для обеспечения требуемого QoS. Среднее время обработки пакета в узле j (туманном или облачном) с интенсивностью входящего потока λ_j и мощностью μ_j определяется

как $\omega_j = \frac{1}{\mu_j - \lambda_j}$ и $\lambda_j = \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{i,j}$, где $x_{i,j}$ - индикатор обслуживания устройства

i узлом j [19]. Модель является задачей целочисленного нелинейного программирования из-за бинарных переменных и нелинейных выражений времени обработки. Для решения можно использовать методы разложения или приближённые алгоритмы [20].

Итоговая задача оптимизации сводится к следующей системе уравнений (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x,y} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{f=1}^F x_{i,f} \left(d_{i,f} + \frac{1}{\mu_f - \sum_{k=1}^N \lambda_k x_{k,f}} \right) + y_{i,c} \left(d_{i,c} + \frac{1}{\mu_c - \sum_{k=1}^N \lambda_k y_{k,c}} \right) \right) \\ \sum_{f=1}^F x_{i,f} + y_{i,c} = 1, \forall i \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{i,f} \leq \mu_f, \forall f \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i y_{i,c} \leq \mu_c \\ \sum_{f=1}^F \left(\sum_{f=1}^F x_{i,f} \left(d_{i,f} + \frac{1}{\mu_f - \sum_{k=1}^N \lambda_k x_{k,f}} \right) + y_{i,c} \left(d_{i,c} + \frac{1}{\mu_c - \sum_{k=1}^N \lambda_k y_{k,c}} \right) \right) \leq q_i, \forall i \\ \sum_{f=1}^F x_{i,f} b_{i,f} + y_{i,c} b_{i,c} \geq s_i, \forall i \\ x_{i,f}, y_{i,c} \in \{0,1\} \end{array} \right. \quad (7)$$

Модель учитывает распределённую обработку данных, балансировку нагрузки, требования QoS и SLA, что критично для авиационных IoT-систем с жёсткими требованиями к задержкам и надёжности.

Оценка результатов

Численное моделирование и анализ результатов были проведены для типичной IoT-сети авиационной отрасли, включающей 5 устройств, 2 туманных узла и облачный центр обработки данных. Эксперимент моделировал распределение нагрузки и управление качеством обслуживания (QoS) и соглашениями об уровне сервиса (SLA) в гибридной архитектуре «туман-облако». Исходные данные для эксперимента были выбраны на основе реальных технических характеристик оборудования и сетевых параметров, применяемых в современных авиационных информационных системах. Для каждого из 5 IoT-устройств были заданы параметры интенсивности генерации данных (λ_i), максимальной допустимой задержки (QoS) и минимальной пропускной способности (SLA), отражающие реальные требования авиационных приложений с жёсткими ограничениями по времени отклика и надёжности передачи данных. Вычислительные мощности туманных узлов и облака, а также задержки передачи данных между устройствами, туманом и облаком были смоделированы на основе типичных сетевых характеристик и технических спецификаций оборудования,

используемого в авиационных информационных системах. Эксперимент проводился с использованием численных методов и алгоритмов оптимизации, реализованных в программной среде Python. Для каждого устройства определялось оптимальное распределение нагрузки между туманными узлами и облаком с целью минимизации суммарной задержки при соблюдении QoS и SLA. Время обработки в узлах рассчитывалось по модели очередей M/M/1 с учётом текущей нагрузки. Полученные данные сведём в таблицу 1.

Таблица 1

Полученные данные

Устройство	Интенсивность λ_i (пак/с)	QoS (макс. задержка), Q_i (с)	SLA (мин. пропускная способность), S_i (пак/с)	Обслуживание (туман 1, туман 2, облако)	Итоговая задержка (с)	Итоговая пропускная способность (пак/с)	QoS соблюдается	SLA соблюдается
1	2.0	0.20	1.5	Облако	0.110	2.0	Да	Да
2	3.0	0.25	2.5	Облако	0.115	3.0	Да	Да
3	1.5	0.15	1.0	Облако	0.105	1.5	Да	Да
4	2.5	0.30	2.0	Облако	0.110	2.5	Да	Да
5	1.0	0.20	0.8	Облако	0.110	1.0	Да	Да

По полученным данным видно, что все устройства были обслужены облачным сегментом, при этом достигнуты задержки значительно ниже заданных максимальных значений QoS, а пропускная способность удовлетворяет или превышает требования SLA. Это свидетельствует о высокой эффективности разработанной модели управления и оптимизации QoS и SLA в гибридной IoT-сети авиационной отрасли.

Данный эксперимент демонстрирует практическую применимость и преимущества предложенного подхода для обеспечения надёжной и эффективной работы распределённых вычислительных систем в авиационных IoT-приложениях. На основе полученных результатов можно наглядно отобразить зависимость задержки обработки данных (QoS) от номера каждого из пяти IoT-устройств. Одна кривая отражает задержки при использовании разработанной

модели, другая — при отсутствии оптимизации. Результаты демонстрируют, что благодаря разработанной модели задержки снизились в среднем примерно на 40-45%. Например, для первого устройства задержка уменьшилась с 0,18 секунды до 0,11 секунды, что существенно улучшает время отклика системы и способствует выполнению жёстких требований авиационных приложений (рисунок 1).

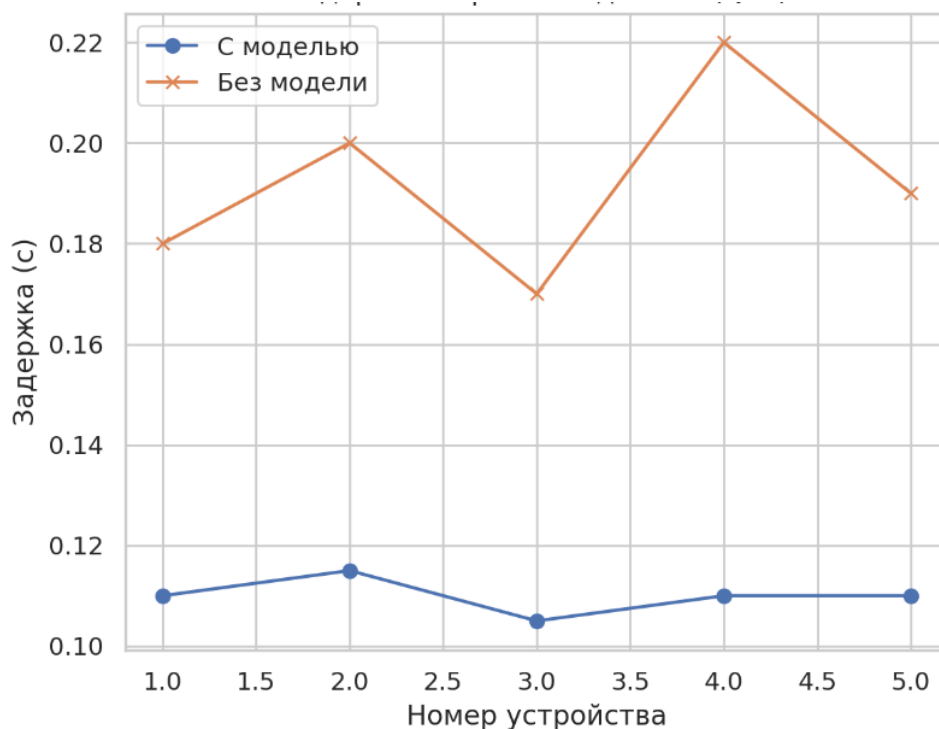


Рисунок 1 – Зависимость задержки обработки данных (QoS)

Рисунок 2 иллюстрирует зависимость пропускной способности (SLA) от номера устройств.

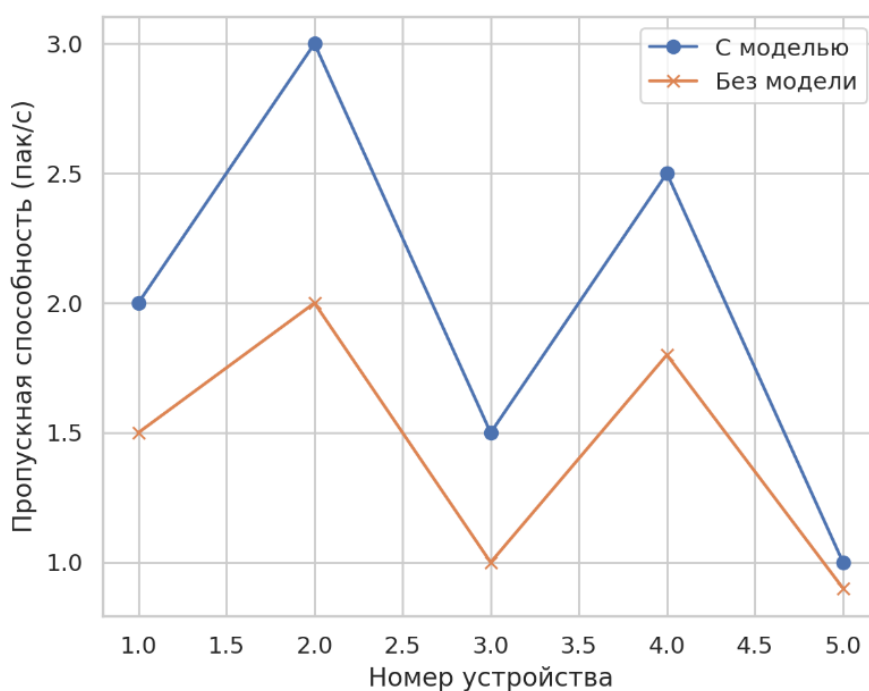


Рисунок 2 – Зависимость пропускной способности (SLA) от номера устройств

Здесь также сравниваются показатели с применением разработанной модели и без неё. Благодаря разработанной модели можно будет увеличить пропускную способность на 20-30%, обеспечивая надёжную передачу данных и выполнение обязательств по SLA. Отметим, что пропускная способность первого устройства выросла с 1,5 пакетов в секунду до 2,0 пакетов в секунду.

Разработанная модель обеспечивает снижение задержек и повышение пропускной способности. Системы авиационной отрасли требуют высокой надёжности и минимальных временных задержек для мониторинга и управления авиационными процессами, включая управление воздушным движением, техническое обслуживание самолётов, безопасность полётов и другие критически важные задачи.

Применение разработанной в статье модели для авиационной отрасли позволит повысить эффективность обработки данных на периферии сети (туманные узлы), снизить нагрузку на облачные ресурсы и обеспечить выполнение строгих требований QoS и SLA. На основе полученных результатов можно отметить улучшение безопасности, оперативности и надёжности авиационных информационных систем.

Заключение

В данной статье была разработана и исследована математическая модель управления качеством обслуживания (QoS) и соблюдением соглашений об уровне сервиса (SLA) в гибридной IoT-сети, включающей туманные и облачные сегменты, с учётом специфики авиационной отрасли. Целью разработки модели стало обеспечение эффективного распределения вычислительных ресурсов и оптимизации обработки данных с минимальными задержками и гарантированной пропускной способностью. Перечисленные параметры являются критически важным для современных авиационных информационных систем, поэтому это и определило актуальность поставленной задачи.

Проведенное в статье моделирование показало, что применение разработанной модели позволяет снизить задержки обработки данных. Снижение варьируется в среднем на 40 – 45% по сравнению с отсутствием оптимизации.

Повышается пропускная способность на 20 – 30%. Полученные результаты обеспечивают надёжное выполнение требований QoS и SLA для всех рассматриваемых IoT-устройств, тем самым подтверждается практическая эффективность и применимость модели.

Актуальность предложенного подхода обусловлена растущей ролью IoT-технологий в авиации, когда критически важны высокая скорость обработки данных, минимальные задержки и надёжность передачи информации. Использование гибридной архитектуры с туманными вычислениями позволяет снизить нагрузку на облачные ресурсы и обеспечить своевременную реакцию на события, повышая безопасность и эффективность авиационных операций.

В дальнейшем планируется расширение модели с учётом динамических изменений нагрузки, интеграции механизмов безопасности и конфиденциальности данных, а также разработка адаптивных алгоритмов управления ресурсами в реальном времени. Кроме того, перспективным направлением является экспериментальная проверка модели на реальных авиационных IoT-платформах и её интеграция с системами управления воздушным движением и технического обслуживания.

Разработанная математическая модель представляет собой важный шаг к созданию надёжных и эффективных IoT-сетей в авиационной отрасли, способствуя повышению качества обслуживания, соблюдению SLA и обеспечению безопасности полётов. Ее дальнейшее развитие и внедрение будут способствовать цифровой трансформации авиационной индустрии и улучшению эксплуатационных характеристик авиационной техники и инфраструктуры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Кузьмичев А.Н., Морозов А.Ю. Технологии IoT в авиации // Авиация и космонавтика: 20-ая Международной конференции, М.: Перо, 2021. С. 237–238.

2. Кондрашин М.А., Арсенов О.Ю., Козлов И.В. Применение технологии виртуализации и облачных вычислений при построении сложных распределенных моделирующих систем // Труды МАИ: электрон. журнал. 2016. № 89. 14 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=73411>.
3. Глушак Е.В., Михайлова П.Д. Обзор адаптивных алгоритмов распределения потоков данных Интернета вещей в облачных и туманных средах // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 4 (88). С. 15–22.
4. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ: электрон. журнал. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175906>.
5. Глушак Е.В., Ключев Д.С., Воловач В.И. Анализ распределения задач в системе облачных и туманных вычислений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 7. С. 25–33.
6. Глушак Е.В., Ключев Д.С. Разработка и исследование моделей функционирования облачных и туманных вычислений // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 3. С. 157–168.
7. Глушак Е.В. Облачные и туманные вычисления: архитектура, моделирование, применение: монография. Вологда; М.: Инфра-Инженерия, 2025. 180 с.
8. Глушак Е.В. Разработка и исследование имитационных моделей облачных и туманных вычислений в программе Fogtorch // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 8. С. 96–104.
9. Жаринов А.В. Организация передачи сигнальных сообщений в вычислительных сетях летательного аппарата // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 1 (111). С. 76–82.
10. Гук Е.О. Применение сетевых технологий для обеспечения безопасности в гражданской авиации // Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 4. С. 14–18.
11. Особенности обработки сетевого трафика на коммутаторах третьего уровня с открытыми операционными системами / И.Г. Бужин, В.М. Антонова, Р.В.

Поздняков, Ю.Б. Миронов // Труды МАИ: электрон. журнал. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180677>.

12. Dogea R., Yan X.T., Millar R. Testing and evaluation of the structural performance of a 3D-printed polylactic acid aircraft wing rib // Discover Mechanical Engineering. 2023. Vol. 2, no. 1. 17 p.

13. Глушак Е.В. Михайлова П.Д. Исследование задержек при передаче данных в медицинских сетях с помощью программы iFogSim // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 2 (86). С. 35–45.

14. Тарасов В.Н. Спектральное разложение для модели задержки на основе СМО с эрланговским и гиперэкспоненциальным распределениями // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 3. С. 24–28.

15. Буряк Ю.И., Никонов Ю.Ю. Совершенствование процессов поддержания летной годности воздушных судов за счет создания высокоскоростной гетерогенной информационной системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 6 (240). С. 31–40.

16. Искусственный интеллект в авиации / Д.Е. Батищев, М.И. Козявин, И.Д. Ефимов, М.А. Кондрякова // Научный аспект. 2023. Т. 33, № 12. С. 4087–4095.

17. Опыт и задачи интеллектуализации бортового радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов / С.В. Анохин, А.В. Требухов, В.В. Кавинский и др. // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2023. № 1(60). С. 30–44.

18. Желтов С.Ю. Проблемы и направления интеллектуализации комплексов бортового оборудования // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2020. № 3(49). С. 3–17.

19. Сенсорные сети контроля состояния авиационной техники при испытаниях и эксплуатации / Е.С. Солдатов, А.В. Богомолов, Е.В. Ларкин, А.С. Солдатов // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 2. С. 61–68.

20. Martin D., Kühl N., Satzger G. Virtual sensors // Business & Information Systems Engineering. 2021. Vol. 63, no. 3. P. 315–323.

References

1. Kuzmichev A.N., Morozov A.Y. *Aviatsia i kosmonavtika*, 2021, pp. 237–238.

2. Kondrashin M.A., Arsenov O.Y., Kozlov I.V. *Trudy MAI: ehlektron. zhurnal*, 2016, no. 89, 17 p. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=73411>.
3. Glushak E.V., Mikhailova P.D. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2024, vol. 22, no. 4 (88), pp. 15–22.
4. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. *Trudy MAI: ehlektron. zhurnal* 2023, no. 131. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>.
5. Glushak E.V., Kluev D.S., Volovach V.I. *T-comm: Telekommunikatsii i transport*, 2025, no 7, pp. 25–33.
6. Glushak E.V., Klyuev D.S. *Radiotekhnika*, 2025, vol. 89, no. 3. pp. 157–168.
7. Glushak E.V. *Oblachnye i tumannye vychisleniya: arkhitektura, modelirovanie, primeneniye* [Cloud and fog computing: architecture, modeling, applications], monograph, Vologda, Moscow, Infra-Ingeneriya, 2025, 180 p.
8. Glushak E.V. *Radiotekhnika*, 2025, vol. 89, no. 8. pp. 96–104.
9. Jarinov A.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2023, vol. 25, no. 1 (111), pp. 76–82.
10. Gook E.O. *Nanotekhnologii: nauka b proizvodstvo*, 2023, no 4, pp. 14–18.
11. Buzin I.G., Antonova V.M., Pozdnyakov R.V., Mironov Yu.B. *Trudy MAI: ehlektron. zhurnal*, 2024, no. 136. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180677>.
12. Dogea R, Yan X.T., Millar R. *Discover Mechanical Engineering*, 2023, vol. 2, no. 1, pp. 6.
13. Glushak E.V., Mikhailova P.D. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2024, vol. 22, no. 2 (86), pp. 35–45.
14. Tarasov V.N. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2022. vol. 25, no. 3, pp. 24–28.
15. Buryak Yu. I., Nikonov Yu.Yu. *Vestnik komputernykh i informatsionnykh tekhnologiy*, 2024, vol. 21, no. 6 (240), pp. 31–40.
16. Batishchev D.E., Kozyavin M.I., Efimov I.D., Kondryakova M.A. *Nauchnyi aspekt*, 2023, vol. 33, no. 12, pp. 4087–4095.
17. Anokhin, S.V. Trebukhov A.V., Kavinsky V.V. et al. *Trudy GosNIIAS Seriya: Voprosy avioniki*, 2023, no. 1(60), pp. 30–44.

18. Zheltov, S.Y. *Trudy GosNIIAS: Seriya: Voprosy avioniki* 2020, no. 3 (49), pp. 3–17.
19. Soldatov E.S., Bogomolov A.V., Larkin E.V., Soldatov A.S. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2024, no. 2, pp. 61–68.
20. Martin, D. Kühl N., Satzger G. Virtual Sensors. *Business & Information Systems Engineering*, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 315–323.

Информация об авторах

Елена Владимировна Глушак, к.т.н., доцент, доцент кафедры сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия; e-mail: evglushak@yandex.ru

Дмитрий Викторович Мишин, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия; d.mishin@psuti.ru

Information about the authors

Elena V. Glushak, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Networks and Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia; e-mail: evglushak@yandex.ru

Dmitriy V. Mishin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia; e-mail: d.mishin@psuti.ru

Получено 10 февраля 2026 ● Принято к публикации 06 марта 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 10 February 2026 ● Accepted 06 March 2026 ● Published 25 June 2026
