

На правах рукописи



**Бурков Артём Андреевич**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СТАБИЛЬНОЙ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ  
СИСТЕМ МАССОВОЙ МЕЖМАШИННОЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.15 —  
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Тюрликов Андрей Михайлович**

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**  
доктор технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, кафедра сетей связи и передачи данных  
профессор кафедры

**Степанов Михаил Сергеевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Московский технический университет связи и информатики, кафедра сетей связи и коммутации,  
доцент кафедры

Ведущая организация: Акционерное общество «Российский институт мощного радиостроения», 199178, г. Санкт-Петербург, 11-я Линия В.О., 66

Защита состоится 26.09.2023 в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. и на сайте [www.guap.ru](http://www.guap.ru).

Автореферат разослан 05.07.2023.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.384.01,  
канд. тех. наук, доцент



А.А. Овчинников

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В рамках разворачивающегося в настоящее время стандарта связи 5G, а также при разработке следующего поколения 6G активно рассматриваются сценарии Интернета вещей (Internet of Things, IoT). При этом некоторые из наиболее важных требований для таких систем не могут быть выполнены полностью в рамках текущих версий сетей. Дальнейшее развитие систем передачи данных к 2030 году повлечет за собой новые, более жесткие требования, как к беспроводной связи, так и к Интернету вещей в частности. С учётом требований, предъявляемых к системам (скорость передачи, задержка и т. д.), различают следующие типы IoT: критический IoT; широкополосный IoT; промышленный IoT; массовый IoT.

В работе рассматривается сценарий массовой межмашинной связи (Massive Machine-Type Communication, mMTC), который является основным сценарием передачи данных в системах массового IoT. В mMTC предполагается работа огромного числа простых устройств (например: датчики температуры, давления, освещенности и счетчики в технологии «умный дом»), которые редко передают малые объемы данных и, как правило, используют автономные источники питания. Основными требованиями к сценарию mMTC являются: 1) Наличие большого (потенциально не ограниченного) количества устройств; 2) Стабильная работа сети при требуемой суммарной интенсивности появления сообщений в системе. Под стабильной работой подразумевается наличие конечной средней задержки в системе при её длительном времени работы; 3) Низкое энергопотребление, которое подразумевает сокращение расходов энергии, как в режиме ожидания, так и при передаче данных. Целью данного требования является повышение срока службы устройства от автономного источника питания без дополнительного обслуживания.

При дальнейшем развитии сетей количество устройств в сценариях mMTC будет порядка миллиона на квадратный километр. Из-за большого количества устройств в рассматриваемом сценарии невозможно использовать методы планирования и расписания для доступа к общему ресурсу канала. Поэтому предполагается использование методов случайного множественного доступа. При потенциально неограниченном числе устройств большинство алгоритмов случайного множественного доступа не обеспечивают стабильной работы системы. Это проявляется в том, что задержка при передаче данных в системе неограниченно возрастает с течением времени её работы.

В настоящее время системы связи не могут поддерживать постоянно возрастающие к ним требования, поэтому необходима модернизация существующих подходов при проектировании сетей. Первым путем является совершенствование методов модуляции и демодуляции, а также согласованных с ними методов помехоустойчивого кодирования. Например, использование новых кодово-модуляционных схем или применение методов комбинирования помехоустойчивого кодирования и повторных передач, например, таких как гибридная решающая

обратная связь. Второй путь — изменение подходов к планированию и распределению ресурсов, то есть модификация методов случайного доступа, в том числе и изменение алгоритмов разрешения конфликтов в системе.

Исторически исследования алгоритмов множественного доступа велись в двух направлениях: теория информации множественного доступа (англ. multiple user information theory) и теория случайного множественного доступа (англ. random multiple-access theory). В течение долгого времени эти направления развивались независимо друг от друга, вследствие чего вопросы стабильности и энергоэффективности вместе не исследовались.

Таким образом, актуальной является задача исследования методов снижения затрат энергии, необходимой для обеспечения стабильной работы систем случайного множественного доступа с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств. При рассмотрении данного вопроса необходимо совместное применение методов анализа из теории информации множественного доступа и теории случайного множественного доступа. В результате предполагается получение актуальных оценок нижних границ и границ достижимости для затрат энергии в системах случайного множественного доступа с потенциально бесконечным числом пользовательских устройств при стабильной работе системы. Данные границы позволят оценить возможности потенциального развития систем массовой межмашинной связи.

### **Степень разработанности темы.**

В направлении теории случайного множественного доступа рассматривается случайное число пользовательских устройств, передающих данные по общему каналу связи. Основное внимание уделяется процессам случайного поступления сообщений в систему, проводится анализ стабильности систем и задержек, определяемых коллизией пользовательских сообщений, но игнорируется влияние шумов в общем канале связи.

Основные результаты в области теории случайного множественного доступа были получены Б.С. Цыбаковым, R Gallager, В. А. Михайловым, А.И. Ляховым, А.М. Тюрликовым. Проблема обеспечения стабильности в системах случайного множественного доступа с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств была сформулирована в работах Б.С. Цыбакова, В. А. Михайлова и J. Carpetanakis еще в 1978 году. Впервые решение данной проблемы было предложено на основе древовидного алгоритма. В последние годы активно рассматривались подходы к расширению области стабильности систем, но это делалось в отрыве от вопросов затрат энергии. Приложение методов этой теории к системам массовой межмашинной связи присутствует в работах А.И. Парамонова, А.Е. Кучерявого, Т.М. Татарниковой.

В работах J. Choi проводились исследования с точки зрения изменения алгоритма случайного множественного доступа для повышения вероятности доставки. Рассматривались следующие основные подходы: применение неортогонального

множественного доступа; применение метода разрешения коллизий с использованием преамбул за счет внедрения фазы исследования. Данные модификации применялись к алгоритмам типа АЛОНА. Исследования проводились с точки зрения теории случайного множественного доступа. Однако в ключевых работах с использованием преамбул рассматривается система с потерями, что снимает проблемы обеспечения стабильности системы, но возникают необратимые потери сообщений.

В направлении теории информации множественного доступа, в отличие от теории случайного множественного доступа, не рассматривается процесс случайного появления сообщений в системе, и для фиксированного числа пользовательских устройств, передающих по общему каналу связи, исследуется влияние шумов канала или наложения сигналов пользователей на скорость передачи в системе.

Основные результаты в области теории случайного множественного доступа были получены Ю. Полянским и О. Ordentlich и основываются на методах кодового разделения при фиксированном числе пользовательских устройств.

Также исследование вопросов применения методов гибридной обратной связи в системах случайного доступа было представлено в работах G. Saire. Исследования проводились в области теории информации множественного доступа. Число пользовательских устройств в системе рассматривалось конечным и известным, а основной целью исследования был анализ максимума спектральной эффективности без учета энергоэффективности.

Первые попытки объединить подходы теории случайного множественного доступа и теории случайного множественного доступа при учете потребления энергии были предприняты в работах Ю. Полянского и О. Ordentlich. Авторы рассмотрели сценарий с большим количеством пользователей в сети, при этом только некоторое подмножество из них осуществляют передачу, а доставка на базовую станцию должна быть успешной с требуемой вероятностью. Количество передающих устройств в рамках модели предполагалось постоянным и известным. Рассматривались несколько алгоритмов для множественного доступа, включая АЛОНА, и анализировались границы достижимости отношения энергии на бит к спектральной плотности мощности шума. Граница достижимости означает не конкретное решение, а только тот факт, что такое решение существует. Описанные в работах модели не допускают повторной передачи сообщений, которые не были доставлены успешно. Ввиду наличия потерь в их модели не возникало проблемы, связанной с обеспечением стабильной работы системы.

**Объектом исследования** являются стабильные системы случайного множественного доступа, описывающие сценарии массовой межмашинной связи с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств.

**Предметом исследования** являются затраты энергии, необходимые для обеспечения стабильной работы систем случайного множественного доступа с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств при фиксированной спектральной эффективности.

**Целью** диссертационной работы является разработка новых моделей систем случайного множественного доступа для определения затрат энергии, необходимой

для обеспечения стабильной работы при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств, и методов, позволяющих снизить эти затраты при фиксированной спектральной эффективности.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Определение особенностей систем массовой межмашинной связи, основных характеристик, используемых в рамках их анализа, а также возможных путей обеспечения стабильной и энергоэффективной работы таких систем.
2. Разработка базовой модели системы для определения затрат энергии, необходимой для обеспечения стабильной работы при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств и анализ энергоэффективности типового алгоритма случайного множественного доступа в рамках этой модели.
3. Модификация модели системы случайного доступа с учетом возможности использования методов гибридной обратной связи и анализ влияния применения этих методов на энергоэффективность в системах случайного множественного доступа.
4. Изменение базовой модели системы для учета применения методов разрешения коллизий с использованием преамбул и разработка алгоритма случайного множественного доступа, который позволит уменьшить энергозатраты по сравнению с типовым алгоритмом ALOHA.
5. Оценка потенциальных возможностей повышения энергоэффективности в стабильных системах массовой межмашинной связи за счет дополнительной обработки данных на базовой станции и изменения алгоритма случайного множественного доступа.

#### **Научная новизна:**

1. Введены новые модели систем, отражающие основные особенности различных сценариев массовой межмашинной связи и характеризующиеся тем, что рассматривается потенциально неограниченное число пользовательских устройств.
2. В рамках введённых моделей сформулированы и решены оптимизационные задачи для вычисления границ достижимости затрат энергии, отличающейся от ранее известных тем, что учитываются условия обеспечения стабильной работы системы.
3. Получены новые нижние границы для затрат энергии на бит, учитывающие влияние повторных передач. Определено необходимое увеличение затрат энергии на передачу для обеспечения стабильной работы систем с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств, по сравнению с пределом Шеннона для случая, когда в системе имеется один источник и один получатель.

4. Впервые исследовано влияние применения методов гибридной обратной связи на затраты энергии в стабильных системах случайного множественного доступа и проведено сравнение с системой на базе алгоритма ALOHA.
5. Предложен новый класс алгоритмов случайного множественного доступа, основанный на методе разрешения коллизий за счет использования преамбул. Разработан алгоритм из этого класса и проведен анализ условий стабильности и характеристик энергоэффективности.

**Теоретическая значимость** работы заключается в уточнении нижних границ для затрат энергии систем случайного множественного доступа при гарантированной доставке сообщений и потенциально неограниченном числе пользовательских устройств; формулировке оптимизационных задач для определения границ достижимости затрат энергии в системах массовой межмашинной связи; получении выражений для оценки нижних границ затрат энергии при использовании гибридной обратной связи в системах случайного доступа; получении замкнутых выражений для оценки нижних границ затрат энергии для предложенного алгоритма разрешения конфликтов, основанного на методе разрешения коллизий за счет использования преамбул.

**Практическая значимость** работы заключается в получении оценок нижних границ и границ достижимости для систем случайного множественного доступа с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств, которые позволяют определить потенциальные возможности алгоритмов случайного доступа на этапе проектирования.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Результаты работы были использованы в рамках научно-исследовательских работ: «Разработка алгоритмов передачи данных в системах IoT с учетом ограничений на сложность устройств», «Исследование и разработка алгоритмов случайного множественного доступа с ограничением на время передачи», «Разработка и прототипирование решения по защите авторских прав на основе цифровых водяных знаков», «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим количеством пользователей». Кроме того, результаты работы использованы в учебном процессе кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения и в ОКР АО «Концерн «Гранит-Электрон» (г. Санкт-Петербург).

**Методология и методы исследования.** Для получения результатов диссертационной работы использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, общесистемный анализ, методы теории информации, методы теории произвольного множественного доступа, методы численного анализа и методы имитационного моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Введены модели систем массовой межмашинной связи с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств и получены границы достижимости затрат энергии при передаче.

2. Для стабильной работы систем случайного доступа на базе ALOHA при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств требуется увеличение затрат энергии на бит не менее чем на 4,32дБ по сравнению с пределом Шеннона.
3. Показано, что использование методов гибридной решающей обратной связи в стабильных системах случайного доступа позволяет уменьшить затраты энергии на бит не более чем на 2,5дБ по сравнению с базовым алгоритмом при любой спектральной эффективности.
4. На основе метода разрешения коллизий с использованием преамбул разработан алгоритм случайного множественного доступа, который позволяет уменьшить затраты энергии по сравнению с алгоритмом типа ALOHA, но не более чем на 1,5дБ при спектральной эффективности 0,1 бит/с/Гц.

**Достоверность.** Достоверность полученных результатов подтверждена результатами моделирования и аналитических расчётов. Результаты, полученные в ходе выполнения исследования, не противоречат ранее известным результатам в областях теории информации множественного доступа и теории случайного множественного доступа.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2017 по 2021 гг.: научных сессия ГУАП (2017-2021 гг.); конференции «The 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT2018)»; конференция «10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems(ICUMT2019)»; конференции «2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2018)»; конференция «2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (ICUMT2019)»; конференции «XVI International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY2019)»; конференции «2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2020); конференция 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2021) и конференции «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: Первая Всероссийская научная конференция».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 3, 6 и 8 паспорта научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при решении задач.

**Личный вклад.** Все результаты, представленные в тексте диссертационной работы, получены автором лично.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 10 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus,

7 — в тезисах докладов. По теме исследования получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 9 таблиц, список литературы содержит 129 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертационного исследования и степень её разработанности, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, описывается новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** описывается специфика сценария массовой межмашинной связи в системах Интернета вещей. Приводится обзор путей развития анализа систем случайного доступа в рамках теории случайного множественного доступа (ТСМД) и теории информации множественного доступа (ТИМД).

В рамках ТСМД рассматривается как конечное, так и потенциально неограниченное число пользовательских устройств и задается общая интенсивность появления сообщений  $\Lambda$  [*сообщений/единицу времени*] (обычно за единицу времени принимается длительность передачи одного сообщения). Основной задачей является анализ таких характеристик системы, как:

- Зависимости средней задержки  $\bar{D}(\Lambda)$  и среднего числа сообщений  $\bar{N}(\Lambda)$  от интенсивности входного потока  $\Lambda$ ;
- Критическая интенсивность входного потока  $\Lambda_{кр}$ , до которой система работает стабильно, определяемая как  $\Lambda_{кр} = \sup\{\Lambda: \bar{D}(\Lambda) < \infty\}$ .

При этом в рамках ТСМД не рассматриваются шумы канала и вопросы энергозатрат на передачу сообщений.

ТИМД является развитием классической теории информации. В рамках ТИМД рассматривается фиксированное число пользовательских устройств, передающих данные по общему каналу. Как и в теории информации используются два показателя энергоэффективности: отношение сигнал/шум  $\gamma$ , определяемое как  $P/N$ , где  $P$  — это мощность принятого сигнала,  $N$  — мощность шума; характеристика  $\frac{E_b}{N_0}$  — это отношение энергии сигнала, приходящейся на один бит передаваемого сообщения ( $E_b$ ), к энергетической спектральной плотности шума ( $N_0$ ) (в работе для краткости изложения используется термин — энергия на бит). При фиксированном значении показателя энергоэффективности определяется предельная скорость передачи или спектральная эффективность:

- Для непрерывного по времени канала, когда сигнал передаётся в течение времени  $T$  в некоторой полосе частот  $W$ , рассматривается спектральная эффективность  $\eta$  [*бит/с/Гц*];
- Для дискретного по времени канала, когда передаваемое сообщение представляет собой набор из  $n$  отсчётов сигнала и содержит  $k$  бит информации, рассматривается спектральная эффективность  $\rho$  [*бит/отсчет*].

Характеристика  $\frac{E_b}{N_0}$  является ключевым показателем энергоэффективности цифровых систем передачи данных. Если зафиксирована спектральная эффективность, то система с меньшим значением  $\frac{E_b}{N_0}$  обеспечит более длительную работу от автономного источника питания.

Оба направления (ТСМД и ТИМД) развивались независимо друг от друга, так как в ТИМД рассматривались сообщения бесконечной длины, а в ТСМД длина сообщения принципиально ограничена. Результаты работ Ю. Полянского и S. Verdu 2010 года и Ю. Полянского 2017 года позволили объединить оба этих подхода на основе следующего утверждения: если заданы значения отношения сигнал/шум  $\gamma$ , числа отсчётов в сигнале  $n$  и числа информационных бит  $k$  в сообщении, то существует кодово-модуляционная схема для которой вероятность ошибки декодирования может быть вычислена по следующему выражению ( $Q(x)$  — это Q-функция от  $x$ ):

$$p_e(n, k, \gamma) = Q\left(\frac{n^{\frac{1}{2}} \log_2(1 + \gamma) + \frac{1}{2} \log_2 n - k}{\sqrt{n^{\frac{\gamma}{2}} \frac{\gamma + 2}{(\gamma + 1)^2} \log_2 e}}\right). \quad (1)$$

В диссертационной работе объединяются оба направления и определена взаимосвязь между спектральной эффективностью  $\eta$  или  $\rho$  (ТИМД) и интенсивностью входного потока  $\Lambda$  (ТСМД):

- Непрерывный по времени канал:  $\eta \triangleq \frac{\Lambda R}{W}$ , где  $R$  — скорость передачи,  $W$  — используемая при передаче полоса;
- Дискретный по времени канал:  $\rho \triangleq \frac{\Lambda k}{n}$ , где  $k$  — количество бит в передаваемом сообщении,  $n$  — число отсчётов, за которые передается сообщение.

Обе характеристики связаны через теорему Котельникова, то есть число отсчётов должно быть в 2 раза больше частоты ( $n = 2WT$ ).

В диссертационной работе рассматривается следующий сценарий. Имеется большое количество автономных пользовательских устройств (ПУ) и одна базовая станция (БС). Для сравнимости результатов с аналогичными исследованиями предполагается, что затухание в канале между ПУ и БС отсутствует и мощности переданного и принятого сигналов совпадают, а мощность шума — постоянная величина. ПУ могут передавать данные на БС и получать от неё служебные сообщения. У ПУ в произвольные моменты времени возникают небольшие сообщения одинаковой длины, которые устройство пытается передать.

Есть два варианта работы системы: при отсутствии канала обратной связи (важной характеристикой является коэффициент успешной доставки пакетов  $P_d$ ); при наличии канала обратной связи (важной характеристикой является значение критической интенсивности входного потока, до которого система работает стабильно ( $\Lambda_{кр}$ )).

В конце первой главы диссертационной работы на качественном уровне описываются две задачи минимизации показателей энергоэффективности при обеспечении требуемой вероятности доставки в системе без обратной связи или стабильной работы в системе с обратной связью. *Первая задача*: минимизация

отношения сигнал/шум. Фактически, это минимизация мощности сигнала при передаче для требуемых параметров системы и фиксированной мощности шума. *Вторая задача:* минимизация значения  $\frac{E_b}{N_0}$ . Фактически, это минимизация потребления энергии для передачи сообщения при заданных требованиях к системе и фиксированной энергетической спектральной плотности шума.

**Во второй главе** сформулированы базовые модели системы массовой межмашинной связи с потенциально неограниченным числом пользовательских устройств и аддитивным белым гауссовским шумом в канале. Основные допущения моделей:

1. Имеется одна БС и множество ПУ. Количество сообщений, появляющихся в системе каждую единицу времени (окно), распределено по закону Пуассона с параметром  $\Lambda$  [*сообщений/окно*]. Каждое сообщение содержит  $k$  бит информации. Используя кодово-модуляционную схему  $A$ , на основе  $k$  бит генерируется сигнал, содержащий  $n$  отсчётов.
2. Существует потенциально бесконечное количество ПУ (в этом случае ПУ и сообщения эквивалентны). ПУ с готовым к отправке сообщением будет называться активным.
3. ПУ и БС имеют синхронизацию как по отсчётам, так и по окнам. Окно — это время, необходимое для передачи одного сообщения, которое длится  $n$  отсчётов.
4. Рассматривается дискретный по времени канал связи с аддитивным белым гауссовским шумом (гауссовский канал множественного доступа), определяемый как  $Y = \sum_{i=1}^{K_t} X_i + Z$ , где  $Y$  — выходной сигнал канала;  $K_t$  — количество пользовательских устройств, передающих сигнал на канал в окне с номером  $t$ , являющееся случайной величиной;  $X_i$  — сигнал  $i$ -го пользовательского устройства;  $Z$  — аддитивный белый гауссовский шум, а  $Z \sim \mathcal{N}(0,1)$ . Максимальная энергия сигнала  $X_i$  ограничена значением  $nP$ , где  $n$  — число отсчётов.
5. Рассматриваются такие кодово-модуляционные схемы  $A$ , что при наложении пользовательских сигналов от нескольких ПУ ни одно из передаваемых сообщений не может быть успешно декодировано.

В тексте диссертации отмечается, что так как дисперсия шума в модели равна 1, то отношение сигнал/шум  $\gamma$  в разгах численно совпадает со значением мощности сигнала  $P$ .

Описанная модель системы характеризуется следующим набором параметров:  $k$  [*биты*],  $n$  [*отсчёты*],  $\Lambda$  [*сообщения/окно*] или спектральная эффективность  $\rho = \frac{\Lambda k}{n}$  [*бит/отсчёт*] и отношение сигнал/шум  $\gamma$  или  $\frac{E_b}{N_0}$ . Рассматриваются две системы.

Первая система не имеет канала обратной связи, а значит отсутствует возможность повторных передач. В рамках этой системы ПУ отправляет появившееся у него сообщение в начале следующего временного окна и удаляет

Таблица 1 — Формулировка задач минимизации энергозатрат

	Задача минимизации отношения сигнал/шум $\gamma$	Задача минимизации энергии на бит $\frac{E_b}{N_0}$
Система без повторных передач	<p><i>Первая задача</i></p> <p>Задано: <math>k, \rho, P_d</math></p> <p>Найти <math>n</math> такое, что:</p> $P_d = e^{-\rho \frac{n}{k}} (1 - p_e(k, n, \gamma))$ <p>и <math>\gamma \rightarrow \min</math></p>	<p><i>Вторая задача</i></p> <p>Задано: <math>k, \rho, P_d</math></p> <p>Найти <math>n</math> такое, что:</p> $P_d = e^{-\rho \frac{n}{k}} \left( 1 - p_e \left( k, n, 2 \frac{k}{n} \frac{E_b}{N_0} \right) \right)$ <p>и <math>\frac{E_b}{N_0} \rightarrow \min</math></p>
Система с повторными передачами	<p><i>Третья задача</i></p> <p>Задано: <math>k, \rho</math></p> <p>Найти <math>n</math> такое, что:</p> $\rho = \frac{k}{n} e^{-1} (1 - p_e(k, n, \gamma))$ <p>и <math>\gamma \rightarrow \min</math></p>	<p><i>Четвёртая задача</i></p> <p>Задано: <math>k, \rho</math></p> <p>Найти <math>n</math> такое, что:</p> $\rho = \frac{k}{n} G e^{-G} \left( 1 - p_e \left( k, n, 2 \frac{E_b}{N_0} \frac{\rho}{G} \right) \right)$ <p>и <math>\frac{E_b}{N_0} \rightarrow \min</math></p>

его. Такая система работает с потерями и, следовательно, необходимо обеспечить требуемую вероятность доставки ( $P_d$ ).

Вторая система имеет канал обратной связи и возможность повторной отправки сообщения. В таком случае можно гарантировать доставку сообщений, однако время от появления сообщения до его успешной доставки является случайным. В данной системе ПУ принимают решение о передаче сообщения в начале каждого окна с вероятностью  $p = \frac{G}{M_t}$ , где  $G \leq 1$  — параметр алгоритма,  $M_t$  — количество активных ПУ в окне с номером  $t$ . Каждое ПУ пытается отправить сообщение до тех пор, пока оно не будет успешно доставлено. В такой системе могут скапливаться активные ПУ и возрастает среднее время доставки сообщений. Поэтому решается задача обеспечения стабильной работы при требуемой спектральной эффективности ( $\rho$ ).

В рамках анализа энергоэффективности были сформулированы и доказаны несколько утверждений, на основе которых предложены четыре *задачи минимизации*. Формулировки этих задач представлены в таблице 1, значение функции  $p_e(k, n, \gamma)$  вычисляется в соответствии с формулой (1), а значения  $\gamma$  при минимизации  $\frac{E_b}{N_0}$ , вычисленные с учетом среднего числа повторных передач сообщения, подставлены в аргумент функции. При рассмотрении системы с повторными передачами значение спектральной эффективности  $\rho$  является предельным для стабильной работы системы, то есть  $\rho = \frac{\Lambda_{кр} k}{n}$ . Решение представленных задач позволяет найти границы достижимости для энергозатрат при заданном числе передаваемых бит, вероятности доставки и спектральной эффективности.

Приводятся численные примеры решения задач минимизации, например, рисунок 1. Результаты представлены при количестве информационных бит  $k = 50 [bit]$ . Вероятность доставки  $P_d$  для системы без повторных передач выбрана из соображений удобства шкалы (для близкого расположения значений и сохранения приемлемого масштаба). Границы достижимости, получаемые через решение задач, позволяют оценить возможности энергозатрат в рассматриваемых

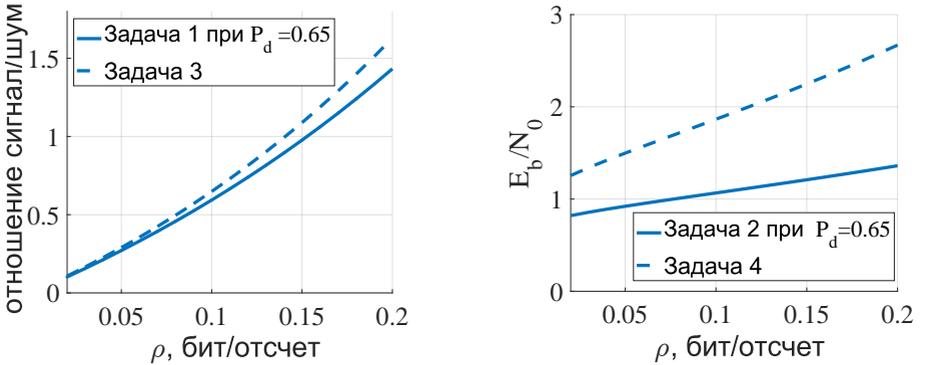


Рисунок 1 — Примеры решения сформулированных задач при числе информационных бит  $k=50$

Таблица 2 — Нижние границы для энергозатрат в системах с повторными передачами и без повторных передач

	Задача минимизации отношения сигнал/шум $\gamma$	Задача минимизации энергии на бит $\frac{E_b}{N_0}$
Система без повторных передач	<i>Первая задача</i> $\gamma > 2^{-\frac{2\rho}{\ln(P_d)}} - 1$	<i>Вторая задача</i> $\frac{E_b}{N_0} > 2^{-\frac{2\rho}{\ln(P_d)}} - 1$
Система с повторными передачами	<i>Третья задача</i> $\gamma > 2^{\frac{2\rho}{e^{-1}}} - 1$	<i>Четвёртая задача</i> $\frac{E_b}{N_0} > \frac{\left(2^{\frac{2\rho}{e^{-1}}} - 1\right)G}{2\rho}$

системах, так как для сценария массовой межмашинной связи свойственна передача коротких сообщений.

Кроме задач, представленных в таблице 1, в диссертационной работе решалась задача минимизации  $\frac{E_b}{N_0}$  при введении дополнительного ограничения на задержку. В результате было показано, что введение данного ограничения может приводить только к увеличению затрат энергии.

Полученные решения сформулированных задач показали, что с ростом числа передаваемых бит уменьшаются значения границы достижимости. Поэтому был рассмотрен следующий предельный переход: число передаваемых бит  $k \rightarrow \infty$ , число отсчётов  $n \rightarrow \infty$ , при этом скорость кодово-модуляционной схемы определяется, как  $R = \frac{k}{n}$ . С использованием прямой теоремы кодирования были выведены выражения для нижних границ энергозатрат, которые приведены в таблице 2.

С использованием нижних границ для энергозатрат (табл. 2, четвёртая задача при  $G = 1$ ) проведено сравнение верхней границы для спектральной эффективности системы случайного множественного доступа при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств на базе алгоритма ALOHA с границей Шеннона (зависимость спектральной эффективности от  $\frac{E_b}{N_0}$ ). Из результатов сравнения следует, что для стабильной работы такой системы требуется увеличение затрат энергии на бит не менее чем на 4,32дБ по сравнению

с пределом Шеннона (значение  $\frac{E_b}{N_0} = -1,59$  дБ при спектральной эффективности, стремящейся к нулю). Соответствующие графики приведены на рисунке 2. Также на данном рисунке представлена зависимость границы достижимости для спектральной эффективности, полученной на основе четвертой задачи из табл. 1 (для  $G = 1$ ), при типовой для систем массовой межмашинной связи длине сообщений  $k = 100$  бит, откуда следует, что при такой длине сообщений необходимо дополнительно увеличить энергозатраты не менее чем на 1,14 дБ.

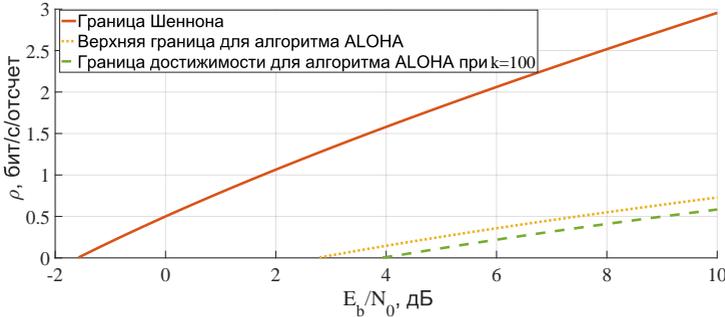


Рисунок 2 — Верхние границы и границы достижимости для спектральной эффективности системы случайного доступа с повторными передачами и для системы с одним пользователем

Также во второй главе диссертационной работы описаны результаты исследования влияния изменения вероятности передачи сообщения ПУ в системе с алгоритмом типа ALOHA на её энергоэффективность.

**В третьей главе** рассматривается применение методов гибридной обратной связи в системах случайного множественного доступа для повышения эффективности систем с обратной связью при наличии повторных передач.

Приводится обзор основных подходов к реализации гибридной обратной связи (ГРОС) для систем с одним источником и одним получателем. Для каждого подхода описаны основные особенности, достоинства, недостатки и способы анализа эффективности методов ГРОС. На основе приведенного обзора и анализа выбраны методы ГРОС для применения в системах случайного множественного доступа.

Модифицирована модель базовой системы с учетом особенностей применения методов ГРОС. Описаны две системы, использующие алгоритм доступа на основе ALOHA. В первой системе используется ГРОС на базе простой обратной связи, называемая первым типом ГРОС. Во второй системе предполагается применение ГРОС, использующей метод комбинирования по Чейзу (второй тип ГРОС).

Приводится анализ описанных систем случайного множественного доступа с применением методов ГРОС. Результаты анализа приведены в таблице 3. Значение спектральной эффективности  $\eta$  является предельным для стабильной работы системы, то есть  $\eta = \frac{\Lambda_{кр} R}{W}$ . В диссертации обосновывается, что среднее число передач  $S(\gamma)$  в зависимости от значения отношения сигнал/шум  $\gamma$  для

Таблица 3 — Спектральная эффективность и энергия на бит в системах случайного доступа с ГРОС

Характеристика системы	Система с ГРОС первого типа	Система с ГРОС второго типа
Нижняя граница для отношения сигнал/шум $\gamma$	$\gamma > 2^{e\eta} - 1$	$\gamma > 2^{S(\gamma)\eta} - 1$
Нижняя граница для энергии на бит $\frac{E_b}{N_0}$	$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2^{e\eta} - 1}{\eta}$	$\frac{E_b}{N_0} > x_0$ , где $x_0$ решение уравнения $x = \frac{2^{S(x)\eta} - 1}{\eta}$

ГРОС второго типа может быть вычислено следующим образом:

$$S(\gamma) = \sum_{s=1}^{\infty} s(P_e(s-1) - P_e(s)), \quad (2)$$

где  $P_e(s) = Pr\left\{\gamma \geq \sum_{i=1}^s \frac{1}{K_i^* + \gamma^{-1}}\right\}$ , а  $K_1^*, K_2^*, \dots$  — последовательность независимых случайных величин, распределенных по закону Пуассона с параметром 1. Для получения значений по формуле (2) применялся метод Монте-Карло.

Из полученных в работе результатов следует, что наиболее эффективно применение ГРОС второго типа, которая позволяет повысить спектральную эффективность при заданном параметре энергоэффективности или уменьшить энергозатраты при заданной спектральной эффективности по сравнению с базовой системой. Так для отношения сигнал/шум максимальный энергетический выигрыш составляет порядка 2дБ в районе спектральной эффективности  $\eta=0,5$ . Максимальный энергетический выигрыш для энергии на бит составляет порядка 2,5дБ, при значении спектральной эффективности  $\eta=0,28$  и с ростом спектральной эффективности он уменьшается (см. рисунок 3).

**В четвёртой главе** модифицирована модель базовой системы для учёта особенностей метода разрешения коллизий с использованием преамбул. Ключевой особенностью модели является то, что в системе имеется  $L$  преамбул, устроенных таким образом, что при наложении в канале БС может однозначно определить, какие преамбулы были в смеси сигналов. В рамках модели описан алгоритм случайного множественного доступа, использующий информацию о преамбулах для перехода в режим разделения по времени при событии "конфликт" (БС формирует расписание для работы в режиме разделения по времени, где список преамбул определяет порядок для повторной передачи ПУ). Данный алгоритм имеет два режима работы: блокированный и неблокированный. Для краткости используются термины блокированный и неблокированный алгоритм. В блокированном алгоритме ПУ, не находящиеся в списке расписания, откладывают свои попытки передачи. В неблокированном алгоритме ПУ, не находящиеся в списке расписания, не откладывают попытки передать появившиеся сообщения и могут пытаться передать их, нарушив работу расписания.

Кратко опишем работу алгоритма на примере блокированного режима. С точки зрения ПУ:

- Шаг 1. При появлении сообщения у ПУ оно равновероятно выбирает одну из  $L$  преамбул и формирует сообщение, состоящее из преамбулы и передаваемых данных.
- Шаг 2. Если система находится в режиме разделения времени (РВ), то ПУ ожидает окончания расписания и затем передаёт сообщение с вероятностью  $p$ . Иначе сразу пытается передать сообщение с заданной вероятностью. Вероятность передачи определяется как  $p = \min\left(\frac{G}{M_{\text{акт}}}, 1\right)$ , где  $M_{\text{акт}}$  — количество активных пользователей в системе,  $G$  — параметр алгоритма, влияющий на вероятность отправки сообщения.
- Шаг 3. После передачи ПУ ожидает ответа от БС. При получении информации о событии "Успех" ПУ удаляет сообщение из буфера. Иначе принимает расписание, составленное БС, и ожидает соответствующего окна для повторной отправки.

Работа алгоритма с точки зрения БС:

- Шаг 1. БС принимает информацию из канала, пытается её декодировать и детектирует список преамбул.
- Шаг 2. На основе результатов, полученных на шаге 1, БС делает вывод о том, какое событие произошло в канале. В зависимости от события БС выполняет следующее:
- Событие "Пусто" — никто не передавал сообщений. БС сообщает ПУ, что в текущем окне никто не передавал.
  - Событие "Успех" — передавало только одно ПУ. БС сообщает ПУ об успешной передаче сообщения.
  - Событие "Конфликт" — передавало 2 и более ПУ. БС формирует расписание на основе списка преамбул и сообщает расписание всем ПУ.

С помощью теории Марковских цепей приведен анализ предельной интенсивности входного потока, до которой рассматриваемые алгоритмы работают стабильно при бесконечном числе преамбул. Для заблокированного алгоритма  $\Lambda_{\text{кр}} = 1$ , для неблокированного  $\Lambda_{\text{кр}} = W(1) \approx 0,5671$ , где  $W(x)$  — это функция Ламберта от  $x$ .

Приводится анализ средней задержки в предложенных алгоритмах. Сравнение средних задержек показало, что заблокированный алгоритм имеет меньшую среднюю задержку.

С помощью теории регенерирующих случайных процессов был проведен анализ для критической интенсивности заблокированного алгоритма при конечном числе преамбул. В результате показано, что  $\Lambda_{\text{кр}} = \frac{Ge^{-\frac{G}{L}}}{1+L\left(1-e^{-\frac{G}{L}}-\frac{G}{L}e^{-G}\right)}$ , где  $L$  — число уникальных преамбул,  $G$  — параметр алгоритма, влияющий на вероятность передачи. Получено, что для каждого числа преамбул существует значение параметра  $G$ , максимизирующее критическую интенсивность. При бесконечном числе преамбул был проведен анализ энергоэффективности предложенных алгоритмов, полученные в результате замкнутые выражения приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Результаты анализа энергоэффективности блокированного и неблокированного алгоритмов разрешения конфликтов.

Характеристика системы	Блокированный алгоритм	Неблокированный алгоритм
Нижняя граница для отношения сигнал/шум $\gamma$	$\gamma > 2^\eta - 1$	$\gamma > 2^{\frac{\eta}{W(1)}} - 1$
Нижняя граница для энергии на бит $\frac{E_b}{N_0}$	$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2(2^\eta - 1)}{\eta}$	$\frac{E_b}{N_0} > W(1)(1 + e^{W(1)}) \frac{2^{\frac{\eta}{W(1)}} - 1}{\eta}$

На рисунке 3 показано сравнение энергоэффективности рассмотренных методов с базовой системой. Получено, что использование предложенных алгоритмов позволяет уменьшить нижнюю границу для отношения сигнал/шум при заданной спектральной эффективности (не более чем на 1,5дБ при спектральной эффективности 0,1 бит/с/Гц). С увеличением значения спектральной эффективности потенциальный выигрыш возрастает. Как видно при спектральной эффективности  $\approx 0,41$  бит/с/Гц энергоэффективность второго типа ГРОС лучше, чем для блокированного алгоритма (это обусловлено спецификой метода разрешения коллизий). Однако при высоких значениях  $\eta$  алгоритмы на основе преамбул дают наибольший выигрыш.

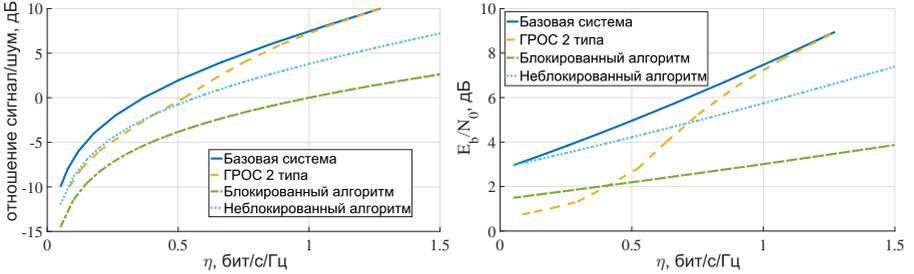


Рисунок 3 — Нижние границы для энергоэффективности рассматриваемых методов ГРОС и алгоритмов разрешения конфликтов

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем: В ходе выполнения диссертационного исследования была поставлена и решена актуальная задача разработки новых моделей систем случайного множественного доступа для определения минимальных затрат энергии, необходимой для обеспечения стабильной работы при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств, и методов, позволяющих снизить эти затраты при фиксированной спектральной эффективности. Получены следующие основные результаты:

1. Введены новые модели систем с наличием или отсутствием повторных передач, которые отражают основные особенности различных сценариев массовой межмашинной связи и позволяют совместно исследовать вопросы стабильности и энергоэффективности при потенциально неограниченном числе пользовательских устройств.
2. Для моделей систем с наличием или отсутствием повторных передач сформулированы и решены оптимизационные задачи, которые позволяют вычислить границы достижимости для энергоэффективности при заданной вероятности доставки сообщения с учетом спектральной

- эффективности системы. Показано, что введение ограничения на задержку в системе увеличивает затраты энергии.
3. Получено, что при фиксированной спектральной эффективности с увеличением объема передаваемых данных затраты энергии на передачу уменьшаются. Для рассмотренных в работе моделей получены замкнутые выражения для расчёта нижних границ энергоэффективности.
  4. Показано, что для обеспечения стабильной работы системы со случайным доступом и потенциально неограниченным числом пользовательских устройств необходимо увеличить затраты энергии не менее чем на 4,32дБ по отношению к системе с одним источником и одним получателем. Данная разница возрастает с ростом значения спектральной эффективности.
  5. Исследовано влияние параметра вероятности передачи в системе на базе алгоритма типа ALOHA и показано, что оптимизация данной вероятности в системе может позволить уменьшить затраты энергии.
  6. Модифицирована модель системы случайного множественного доступа на базе алгоритма ALOHA при наличии повторных передач для исследования влияния методов гибридной обратной связи на стабильность и энергоэффективность. Показано, что применение таких методов может позволить увеличить критическую интенсивность входного потока, до которой система стабильна, и уменьшить нижние границы для затрат энергии по сравнению с базовой системой.
  7. Описана модель системы и предложен класс алгоритмов случайного множественного доступа, основанный на методе разрешения коллизий за счет использования преамбул и использующий временное переключение в режим с разделением по времени. В рамках данного класса разработан алгоритм, который может работать в заблокированном и неблокированном режиме.
  8. Для разработанного алгоритма проведен анализ условий стабильности, критической интенсивности входного потока при конечном и бесконечном числе преамбул, а также проведен анализ средней задержки в системе и её энергоэффективности.
  9. Проведено сравнение систем на основе рассмотренных методов с системой на базе алгоритма ALOHA, и получено, что при увеличении значения спектральной эффективности выигрыш от применения методов гибридной обратной связи уменьшается, а от применения метода разрешения коллизий за счет использования преамбул выигрыш возрастает.

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Бурков, А. А.* Верхняя оценка спектральной эффективности для систем с гибридной решающей обратной связью при ограничении на вид модуляции [Текст] / *А. А. Бурков, А. М. Тюрликов* // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. — 2020. — № 1. — С. 74—83.
2. *Burkov, A. A.* Lower bound for average delay in unblocked random access algorithm

- with orthogonal preambles [Текст] / A. A. Burkov, S. V. Shneer, A. M. Turlikov // Информационно-управляющие системы. — 2020. — 3 (106). — С. 79–85.
3. *Burkov, A. A.* Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems [Текст] / A. A. Burkov // Информационно-управляющие системы. — 2021. — 5 (114). — С. 51–58.
  4. *Burkov, A. A.* Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase [Текст] / A. A. Burkov, R. Rachugin, A. Turlikov // Информационно-управляющие системы. — 2022. — 5 (120). — С. 49–59.
  5. *Burkov, A. A.* Comparison of the ways to reduce energy costs in stable massive machine-type communication systems [Текст] / A. A. Burkov // Информационно-управляющие системы. — 2023. — № 2. — С. 39–50.

### **В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science**

6. Upper bound and approximation of random access throughput over chase combining HARQ [Текст] / A. Burkov, N. Matveev, A. Turlikov, A. Bulanov, O. Gahnina, S. Andreev // 2017 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE. 2017. — С. 143–147.
7. *Burkov, A.* Throughput Analysis of the System of Random Multiple Access with Separation by Signal Power [Текст] / A. Burkov, N. Stepanov // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE. 2018. — С. 1–6.
8. Achievability Bounds for Massive Random Access in the Gaussian MAC with Delay Constraints [Текст] / A. Burkov, A. Frolov, P. Rybin, A. Turlikov // 2019 XVI International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY). — IEEE. 2019. — С. 224–227.
9. *Apanasenko, N. V.* Performance Analysis of ZF and MMSE Algorithms for MIMO Systems [Текст] / N. V. Apanasenko, A. A. Burkov, A. M. Turlikov // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2018. — С. 1–4.
10. Comparison of eMBMS transmission methods with unicast in low SNR conditions [Текст] / S. Mitrofanov, A. Burkov, A. Bulanov, A. Turlikov // 2017 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE. 2017. — С. 123–128.
11. *Burkov, A.* Contention-based protocol with time division collision resolution [Текст] / A. Burkov, A. Frolov, A. Turlikov // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE. 2018. — С. 1–4.
12. *Burkov, A.* An achievability bound of energy per bit for stabilized massive random access Gaussian channel [Текст] / A. Burkov, S. Shneer, A. Turlikov // IEEE Communications Letters. — 2020. — Т. 25, № 1. — С. 299–302.

### **В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus**

13. *Burkov, A.* Throughput Analysis of Adaptive ALOHA Algorithm Using Hybrid-ARQ with Chase Combining in AWGN Channel [Текст] / A. Burkov, N. Kuropatkin, N. Matveev // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. — Springer, 2017. — С. 519–525.

14. *Burkov, A.* Upper and Lower Bound for Non-Blocking Random Multiple Access Algorithm with Time Division Mode [Текст] / A. Burkov, A. Saveliev, A. Turlikov // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE. 2019. — С. 1–7.
15. *Burkov, A. A.* Arbitrarily Accurate Approximation of Numerical Characteristics of Stationary ALOHA Channels [Текст] / A. A. Burkov, S. Shneer, A. M. Turlikov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE. 2021. — С. 1–8.

### **Свидетельства о государственной регистрации**

16. *Бурков, А.А., Рачугин Р.О.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619083 Российская Федерация. Программа моделирования многоканальной системы случайного множественного доступа на базе ALOHA с фазой исследования: № 2023618482 : дата поступления 04.05.2023 : дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 04.05.2023 / А.А. Бурков, Р.О. Рачугин; правообладатель ГУАП – 1 с. [Текст].

### **В сборниках трудов конференций**

17. *Бурков, А.* Выбор параметров помехоустойчивого кодирования в системах передачи данных с гибридной решающей обратной связью [Текст] / А. Бурков // Научная сессия ГУАП. — СПб: ГУАП, 2017. — С. 267–273.
18. *Бурков, А.* Исследование системы случайного множественного доступа с использованием ортогональных преамбул [Текст] / А. Бурков, А. Тюрликов // Научная сессия ГУАП. — СПб: ГУАП, 2018. — С. 326–332.
19. *Бурков, А.* Анализ энергетической эффективности системы случайного множественного доступа с гарантированной доставкой сообщений [Текст] / А. Бурков, А. Тюрликов // Научная сессия ГУАП. — СПб: ГУАП, 2019. — С. 314–318.
20. *Бурков, А.* Анализ неблокированного алгоритма случайного множественного доступа с режимом разделения по времени [Текст] / А. Бурков, А. Савельев, А. Тюрликов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. — СПб: ГУАП, 2019. — С. 147–153.
21. *Митрофанов, С.* Анализ использования гибридной повторной передачи в широкоэмитательных сетях [Текст] / С. Митрофанов, А. Бурков // Научная сессия ГУАП. — СПб: ГУАП, 2018. — С. 366–371.
22. *Бурков, А.* Сравнение блокированного и неблокированного алгоритмов случайного множественного доступа с динамическим расписанием [Текст] / А. Бурков, А. Савельев // Научная сессия ГУАП. — СПб: ГУАП, 2019. — С. 306–313.
23. *Бурков, А.* Анализ спектральной эффективности систем случайного множественного доступа без подтверждений и с подтверждениями [Текст] / А. Бурков // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах. — СПб: ГУАП, 2020. — С. 234–240.

---

Печатается в авторской редакции

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 303

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д.67, лит. А