

На правах рукописи



Романова Анна Александровна

**Модели и методы оценки вероятностно-энергетических характеристик
информационного взаимодействия в интернете вещей**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2023

Работа выполнена на кафедре Информационные системы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Научный руководитель: **Верзун Наталья Аркадьевна,**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационные системы СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Официальные оппоненты: **Маколкина Мария Александровна,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных ФГБОУ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург

Комаров Михаил Михайлович,
кандидат технических наук, профессор департамента бизнес-информатики Высшей школы бизнеса федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), г. Нижний Новгород

Защита состоится «20» февраля 2023 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.387.03, созданного при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» и на сайте <http://www.etu.ru/> в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» – «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «19» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.387.03,
к.т.н.

Цехановский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Цифровая революция быстро набирает обороты, что приносит много преимуществ и предоставляет новые возможности для всех сфер деятельности человека. Цифровизация ведет к развитию и усовершенствованию принципов создания и функционирования сетей связи, что проявилось, в частности, в появлении концепции интернета вещей (Internet of Things – IoT).

В наше время интернет вещей находит широкое применение в промышленности, в сельском хозяйстве, в энергетике, в медицине, на транспорте, в офисах и жилых помещениях, на улицах городов и на территориях природных объектов. Реализовано множество приложений на базе этой концепции существенно меняющих деятельность во многих предметных областях. Большое значение исследования интернета вещей имеют для развития методологии 4-й промышленной революции.

Интернет вещей физически представляет собой компьютерную сеть, которая объединяет цифровые датчики сбора данных, определяемых предметной областью, и процессор для обработки собранных данных. В основе интернета вещей лежит ряд технологий, к числу которых относится технология сенсорных устройств. Датчики сбора данных интернета вещей – это разнообразные сенсорные устройства, использующие беспроводные технологии для общения друг с другом и с внешней средой. Для сенсорных устройств интернета вещей характерно, что они имеют автономное питание, подвижны и могут менять свое положение в пространстве, взаимодействуют с внешним окружением по радиосетям, могут выполнять функцию не только рабочих станций. Сенсорное устройство может быть транслятором и может выполнять функцию ретрансляции сообщений от других сенсорных устройств.

При создании сети IoT возникает проблема в организации взаимодействия устройств друг с другом, принимающей во внимание совокупность вышеперечисленных особенностей. Для решения этой проблемы актуальным является создание моделей информационного взаимодействия, которые будут учитывать:

- физическую составляющую информационного взаимодействия, то есть: положение устройства в пространстве; энергию, которая потребляется сенсорным устройством; а также время, которое уходит на решение физических задач;

- кибернетическую составляющую, а именно, то на сколько задерживается сообщение при передаче по сети, какое среднее время ожидания сообщения, какова вероятность того, что сообщение дойдет вовремя.

Любая сеть электросвязи в процессе своего функционирования потребляет физические ресурсы. К ним относят пространственные, временные и энергетические ресурсы. При создании эксплуатации инфраструктурных (фиксированных) сетей, таких как, например, телефонные сети общего пользования, основное внимание уделялось разработке моделей, которые позволяли бы оценивать вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных, т. е. характеристики, зависящие от сетевого трафика. Пространственные и энергетические характеристики подобных сетей рассматривались как статические, т. е. неизменные в процессе их функционирования, что было оправдано, поскольку пространственное расположение элементов сетей и их энергопотребление не изменялись в ходе предоставления услуг связи.

Одним из существенных отличий сенсорных сетей интернета вещей является динамический характер и пространственных, и временных, и энергетических характеристик. Так, например, умные вещи, являющиеся источниками нагрузки в интернете вещей, могут менять свое пространственное расположение в ходе информационного взаимодействия с другими умными вещами или внешним окружением. Они,

как правило, получают энергию от автономных источников питания, емкость которых ограничена, а это означает, что объемы трафика и услуг зависят от ресурса этих батарей. Времена доставки сообщений, в свой черед, зависимы от локации участников информационного взаимодействия в интернете вещей, от размера охватываемого пространства и плотности их размещения в этом пространстве.

Указанные различия требуют разработки новых моделей процесса информационного взаимодействия, таких, которые будут учитывать не только параметры трафика, но также и параметры зоны охвата, и источников автономного питания.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время в России в сфере проектирования, разработки систем и сетей интернета вещей, моделирования процессов информационного взаимодействия в интернете вещей работают ученые В.А. Богатырев, А.Е. Ваняшин, В.М. Вишневецкий, А.Ю. Гребешков, М.О. Колбанев, С.В. Кучерявый, А.В. Росляков, Т.М. Татарникова. Также в России в работах и исследованиях О.И. Кутузова, Б.Я. Советова, А.М. Тюрликов, О.С. Чугреева, Г.Г. Яновского рассматриваются принципы построения, протоколы и модели информационного взаимодействия в телекоммуникационных сетях, к числу которых относятся сети интернета вещей. Из зарубежных специалистов, внесших существенный вклад в сферу исследований процессов функционирования сетей и систем интернета вещей, следует отметить: В. Bellalta, М. Bhuptani, С. Buratti, М. Gibbs, R. Verdone.

Цель диссертационной работы состоит в разработке моделей и методов оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.

Для того чтобы достичь указанной цели исследования в работе были поставлены, обоснованы и решены следующие **задачи**:

1. Проведён анализ отличительных особенностей процессов информационного взаимодействия в интернете вещей.
2. Разработан комплекс математических моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.
3. Разработаны имитационные модели для оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей
4. Разработаны методы оценки вероятностно-энергетических характеристик взаимодействия в интернете вещей.

Объект исследования: сенсорные сети интернета вещей.

Предметом исследования являются процессы информационного взаимодействия в сенсорных сетях интернета вещей.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует следующим областям исследования паспорта специальности «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Методы и средства исследования. Решение сформулированной в диссертационной работе проблемы разработки моделей и методов оценки вероятностно-

энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей задач было основано на применении следующих методов: теории графов, теории построения сетей связи, системном анализе, теории массового обслуживания, теории имитационного моделирования. Экспериментальная разработка модели выполнялась на основе использования программных продуктов Maple, AnyLogic, с применением функций в C, Java.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. К числу характеристик сенсорных сетей интернета вещей необходимо отнести вероятностно-энергетические характеристики, которые зависят от параметров трафика, линейных размеров зоны охвата, мощности радиосигнала и других параметров.
2. Комплекс аналитических моделей информационного взаимодействия в беспроводной сенсорной сети интернета вещей.
3. Модель оценки вероятностно-энергетических характеристик сенсорных устройств интернета вещей в трехмерном пространстве.
4. Модель регулируемого множественного доступа в сенсорной сети интернета вещей.
5. Имитационные модели информационного взаимодействия в сенсорных сетях интернета вещей.

Научная новизна работы заключается в том, что совокупность разработанных результатов диссертационной работы позволяет получить:

Заключение о выявлении, по результатам проведенного анализа особенностей процессов взаимодействия в интернете вещей, в качестве критериев оценки информационного взаимодействия – вероятностно-энергетических характеристик, учитывающих физические параметры эфирных сетей.

Аналитические модели, которые в отличие от известных учитывают пространственные характеристики сети, что позволяет оценивать вероятностно-энергетические характеристики при пуассоновских потоках сообщений.

Имитационные модели процесса функционирования приближенные к естественным условиям функционирования сетей и позволяющие оценивать вероятностно-временные характеристики при условии произвольных входных потоков и произвольных временах обслуживания сообщений.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в полученных математических моделях, расчетных выражениях и имитационных моделях оценки вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей, необходимых при проектировании сенсорных сетей IoT.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в результате проведенного исследования, обеспечивается:

- обоснованным применением моделей и методов оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей;
- экспериментальной проверкой результатов исследований с применением реализованных программных средств.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертации в ходе проведения теоретических, прикладных и экспериментальных исследований нашли применение при разработке следующих программ:

1. Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ECMAN) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666925, 17.12.2019. Заявка № 2019665698 от 02.12.2019.

2. Программа расчета характеристик 2-х фазной системы множественного доступа с явными потерями на 1-ой фазе (MASWOLFP) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2020664458, 13.11.2020. Заявка № 2020660132 от 09.09.2020.

3. Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОВВХПСВД) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU2022617589, 22.04.2022. Заявка №2020660132 от 18.04.2022.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы, докладывались, обсуждались и одобрены на 14 международных и Российских конференциях.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 26-ти печатных работах, в том числе 5 научных статей, изданных в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в базе WoS и Scopus, имеются 3 свидетельства государственной регистрации программ, а также материалы опубликованные в изданиях, входящих в базу данных научного цитирования РИНЦ и материалах сборников конференций – 16.

Личный вклад соискателя. Все результаты, полученные в ходе исследований в рамках диссертационной работы, в том числе постановка задачи, сбор экспериментальных данных, непосредственное проведение исследований, разработка и исследование защищаемых методов, моделей и алгоритмов, основные научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат лично автору работы.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, и приложения. Основная часть диссертационной работы излагается на 124 страницах машинописного текста. Работа содержит 33 рисунка и 2 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, определена и сформулирована проблема, а также состояние и степень ее разработанности, формулируются объект, предмет, цели и задачи, рассмотрены методы исследования, его этапы, характеризуется новизна, теоретическая и практическая значимость проводимых исследований, раскрываются основные положения, выносимые на защиту, описывается теоретико-методологическая база исследования.

В первой главе дается общая характеристика сквозных цифровых технологий, рассмотрены технологии интернета вещей и описаны характерные особенности сенсорных полей, проанализированы особенности управления информационным взаимодействием в интернете вещей, рассмотрены пространственные, временные, энергетические характеристики беспроводных сенсорных сетей.

Сквозные технологии – это перспективные цифровые технологии, внедрение которых в разные сферы деятельности, кардинальным образом меняет модель этой деятельности, повышают её эффективность. В 2017 г. утвержден список таких технологий. Он включает: нейротехнологии и искусственный интеллект, робототехнику, интернет вещей, технологии хранения энергии и квантовых вычислений и др.

Интернет вещей называют 4-й волной промышленной революции. Одной из ключевых особенностей технологий 4-й промышленной революции является ассоциация между информацией и физическими объектами, при которой границы между

реальными и виртуальными процессами стираются. Успешное использование интернета вещей наряду с другими сквозными технологиями – важный фактор, влияющий на будущее человечества. Интернет вещей можно рассматривать с двух позиций: 1 – соединение между устройствами; 2 – подключение устройств к человеку.

Типичным примером соединения между устройствами может быть система удаленного мониторинга или управления интеллектуальным счетчиком, различным оборудованием. Примером устройств, подключаемых к человеку, служат устройства медицинского, диагностического назначения. Например, прикрепленные к запястью или ноге для подсчета потраченных калорий или пройденных шагов.

Можно выделить следующие основные технологии интернета вещей:

1. Идентификации – технологии распознавания одной вещи от другой.
2. Взаимодействие умных вещей (УВ) – всепроникающие беспроводные сенсорные сети (БСС).
3. Технологии автономного энергоснабжения.
4. Датчики для измерения характеристик объектов и их внешней среды основываются на естественных законах физики, химии, биологии, географии, астрономии и геологии.
5. Электронно-вычислительные машины различной степени интеграции, используемые для обработки данных.

Интернет вещей – это следующая ступень интеграции УВ по сравнению с технологией М2М. Теперь вещи не только используют для передачи данных имеющиеся глобальные и локальные сети, но и образуют сенсорные поля, т. е. взаимодействуют друг с другом при помощи созданной специально для них сетевой инфраструктуры – всепроникающей беспроводной сенсорной сети. Сенсорная сеть – это совокупность интеллектуальных объектов (сенсорных устройств), подключенных друг к другу и к облаку, которые обеспечивают измерение физических параметров окружающей среды. Характерными особенностями сенсорных полей являются:

- широкий разброс геометрический размеров от долей метров до километров, и способность к масштабированию;
- автономность работы каждого устройства, которое имеет собственное питание и функционирует по собственному алгоритму;
- большое разнообразие сенсоров, осуществляющих комплексные измерения самых разных параметров пространства;
- способность к самоорганизации при случайном изменении количества и места расположения взаимодействующих сенсоров из-за их отказов, перехода в режим сна, мобильности и т. п.;
- использование беспроводных технологий передачи сигналов;
- низкое энергопотребление из-за невозможности частой замены или подзарядки аккумуляторов в процессе работы;
- широкий диапазон скоростей передачи данных и допустимого времени реакции на происходящие события и др.

Все характеристики всепроникающих беспроводных сенсорных сетей можно разделить на 3 группы: пространственные, временные, энергетические.

Сенсорная сеть отличается от стационарной тем, что в качестве терминалов используется множество подвижных автономных интеллектуальных объектов. Широкий диапазон областей применения интернета вещей приводит к:

- 1) существенному «разбросу» требований к пространственно-временным и энергетическим характеристикам сетей, используемым в разных сферах.

Например: бесплотный автомобиль располагает мощным аккумулятором, перемещается на больших расстояниях. Ему нужна низкоскоростная связь с центром управления и навигационной системой, и, при этом, высокие скорости информационного взаимодействия со всеми объектами, находящимися на близком расстоянии; умное поле в сельском хозяйстве или умный дом со счетчиками воды, датчиками температуры и влажности, системами охраны: должны взаимодействовать с базовой станцией при помощи низкоскоростных каналов связи, но обязательно на большом расстоянии и при жесткой экономии энергии автономного источника питания.

2) существенной взаимозависимости между пространственными, временными и энергетическими характеристиками сети под влиянием внешних условий.

Например: увеличение линейных размеров сенсорного поля ведет к росту энергетических затрат на излучение радиосигналов каждой УВ в соответствии с формулой Фрииса; изменение скорости передвижения одной УВ ведет к более частому изменению размеров сенсорного поля, маршрутов передачи данных, повышает требования к скорости обработки информации и увеличивает энергозатраты других УВ.

3) к зависимости времени жизни сенсорных сетей от продолжительности работы источников энергии каждого сенсорного устройства. Экономия энергии УВ – важный приоритет разработчиков всепроникающих БСС. Энергосбережение обеспечивается аппаратно-программными и системными методами.

Аппаратно-программные методы связаны с технологиями производства устройств. Необходимо ориентироваться на современный техпроцесс и надежность при выборе чипов и др. компонент, стремиться к уменьшению напряжения питания, применять эффективные схемные решения, использовать системное программное обеспечение, соответствующее особенностям сенсорных узлов и т. д.

Системные методы энергосбережения ориентированы на рациональное построение физической среды и алгоритмов взаимодействия УВ друг с другом и другими сетевыми элементами. В основе решений лежат такие предпосылки:

- свойства среды зависят от радиочастотного диапазона;
- топология сети определяет правила физического взаимодействия элементов сети друг с другом и, влияет на уровни сигналов, излучаемых элементами;
- протоколы физического, канального и сетевого уровней должны строиться, исходя из увеличения времени жизни сети в целом;
- дополнительный (служебный) трафик значительно увеличивает энергозатраты УВ;
- помехоустойчивое кодирование и квитирование – энергозатратные процедуры. Возможно, влияние ошибок можно уменьшить за счет повышения уровня излучаемых сигналов или исправления ошибок протоколами верхних уровней;
- сжатие данных является эффективным механизмом уменьшения энергопотребления умными вещами, благодаря уменьшению числа излучаемых знаков.

Указанные выше особенности функционирования сетей интернета вещей делают актуальной задачу разработки новых моделей процесса информационного взаимодействия в них, таких, которые будут учитывать не только параметры трафика, но также и параметры зоны охвата, и источников автономного питания и пр. Задача диссертационного исследования может быть сформулирована как задача разработки моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.

Во второй главе представлен результат разработки нескольких аналитических моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в БСС интернета вещей:

1. Математическая модель, представляющая процесс функционирования БСС интернета вещей. Модель учитывает протоколы функционирования сети, охватывающие 1 и 2 уровень (физический и канальный) модели OSI и отображает взаимовлияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических свойств информационных взаимодействий УВ в беспроводной среде передачи и предоставляет возможность найти баланс между затратами энергии на организацию информационного взаимодействия и качеством обслуживания пользователей. Рассматривается зависимость характеристик: среднего времени доставки сообщения и вероятности его своевременной доставки, информационной скорости передачи информации в реальном времени в беспроводной среде от мощности передаваемого радиосигнала. Ниже даны окончательные выражения для расчета характеристик.

1) Выражение для расчета среднего времени доставки сообщения [с]:

$$\bar{t} = \frac{N \cdot T_{\text{ок}} (\lambda \cdot N \cdot T_{\text{ок}} - 2)}{2(\lambda \cdot N \cdot T_{\text{ок}} - 1)}$$

где N – число УВ, $T_{\text{ок}}$ – длительность временного окна [с], λ – интенсивность входного потока сообщений от каждой УВ [сооб/с] (предполагаются пуассоновские потоки). Формула для расчета длительности временного окна:

$$T_{\text{ок}} = \frac{n_{\text{к}} n_{\text{кв}}}{B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}} \right)} + t_{\text{rij}} + t_{\text{дкк}} + t_{\text{rji}} + t_{\text{дккв}},$$

где $n_{\text{кв}}$ – длина квитанции [бит], t_{rij} и t_{rji} – времена распространения сигнала от i -ой станции к j -ой и в обратном направлении соответственно [с], $t_{\text{дкк}}$ и $t_{\text{дккв}}$ – времена декодирования кадра и квитанции [с], в выражение входит также пропускная способность канала, которая оценивается по формуле Шеннона-Хартли и зависит от B – частоты радиоканала [Гц], мощности радиосигнала на передающей антенне – $P_{\text{пер}}$ [Вт] и мощности шума в радиоканале – $P_{\text{шум}}$ [Вт].

2) Формула для расчета вероятности своевременной доставки сообщения:

$$Q = \frac{\frac{1}{T_{\text{доп}}} (1 - \lambda \cdot N \cdot T_{\text{ок}})}{\frac{1}{T_{\text{доп}}} \cdot \lambda + \lambda \cdot e^{-\frac{1}{T_{\text{доп}}} \cdot N \cdot T_{\text{ок}}}} e^{-\frac{1}{T_{\text{доп}}} \cdot N \cdot T_{\text{ок}}}$$

где $\overline{T_{\text{доп}}}$ – среднее допустимое время старения сообщений [с].

3) Информационная скорость реального времени сети [бит/с]:

$$R_{\text{с}}^{\text{PB}} = R_{\text{с}}^{\text{ОП}} \cdot Q, R_{\text{с}}^{\text{ОП}} = k \cdot N \cdot \lambda,$$

где $R_{\text{с}}^{\text{ОП}}$ – информационная скорость общего применения БСС [бит/с].

При разработке матмодели, представляющей процесс работы БСС интернета вещей, учтены особенности ее функционирования на физическом и канальном уровнях модели OSI. А именно: на физическом уровне в беспроводной среде передачи сигналы передающие сообщения подвержены воздействию белого шума, на канальном уровне для доступа узлов к общей разделяемой среде передачи используется алгоритм множественного доступа синхронно-временной.

2. Математическая модель для количественной оценки характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве УВ.

Рассматривается БСС, состоящая из большого числа сенсорных устройств, расположенных в трехмерном пространстве с автономным питанием. Для сокращения трудозатрат, связанных с заменой электрических батарей, следует обеспечить энергосберегающие режимы работы сенсоров, поэтому разработка модели для оценки соответствующих характеристик для трехмерного пространства актуальна и имеет практическое значение (рассматривается пример из сельского хозяйства).

Модель учитывает в комплексе пространственные, временные и энергетические характеристики сети: геометрический размер и плотность сенсорного поля, частотный диапазон взаимодействия, стратегию выбора ретранслирующего сенсорного устройства при формировании маршрута передачи сообщений к базовой станции, длину и время передачи сообщений, затраты электроэнергии при передаче.

Окончательное выражение для расчета средней энергии, затрачиваемой на передачу блока данных ближайшему объекту, имеет следующий вид:

$$\bar{e} = \frac{8 E_{\text{пр}} \pi^{\frac{10}{3}} 2^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{2}{3}} \left(\left[\frac{3}{4} \cdot \frac{R 2^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{1}{3}} \lambda^{\frac{1}{3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}{\pi^{\frac{2}{3}}} \right] + 1 \right) \gamma b}{27 \lambda^{\frac{2}{3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)^2 C_{\text{пр}} C_{\text{пер}} \nu_c}$$

где $E_{\text{пр}}$ – постоянная мощность радиосигнала на принимаемой антенне [Вт], $C_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны, $C_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приёмной антенны, ν_c – скорость света, $\Gamma()$ – гамма-функция, γ – интенсивность передачи блоков данных устройством, b – длина передаваемых блоков (бит), λ – плотность распределения устройств в объёме, R – радиус шара.

В исследовании проанализированы особенности процесса энергопотребления беспроводных сенсорных сетей в сельскохозяйственных приложениях. Исследование позволило определить показатели для оценки характеристик энергопотребления сенсорных устройств в трехмерном пространстве и разработать модель.

Предложены метод и модель для комплексной оценки пространственных, временных и энергетических характеристик. Метод позволяет увидеть, как одни характеристики зависят от других и, в свою очередь, влияют на них.

3. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей. Модель, позволяет оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных УВ интернета вещей разных типов. Физическая структура исследуемой беспроводной сети последней мили приведена на рис. 1.

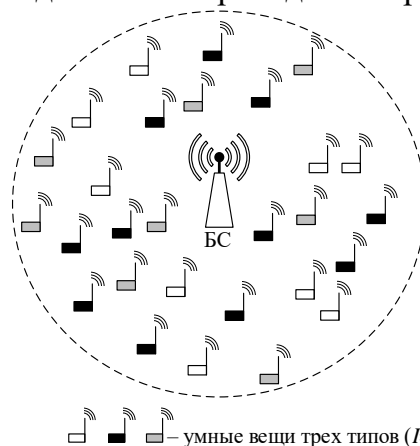


Рисунок 1 – Физическая структура беспроводной сети последней мили

Базовая станция (БС) обеспечивает множественный доступ УВ к глобальным инфокоммуникационным ресурсам. Зона её действия охватывает пространство, на котором расположены УВ I типов. На рис. 1 выделено три типа таких вещей ($I=3$, $i=1,2,\dots,I$). БС использует фиксированное число (Z) однотипных радиоканалов. Каждый радиоканал является общим разделяемым ресурсом для некоторого числа УВ. Для разделения канального ресурса используются алгоритмы множественного доступа. В рамках данного исследования предполагается, что для каждого типа УВ устанавливается экспоненциальное время допустимой задержки блока данных со средним значением T_i [с], $i=1,2,\dots,I$.

Одно передаваемое сообщение от УВ всех типов представляет собой один блок данных длиной k [бит], поэтому временные окна для передачи этих блоков имеют одинаковую длительность. Это позволяет при использовании регулируемого синхронно-временного доступа организовать N временных окон в каждом из Z радиоканалов. Таким образом, общее число временных окон, доступных УВ, равно:

$$W = N \cdot Z .$$

При администрировании работы такой сети имеется возможность разными способами распределять пропускную способность радиоканалов между УВ разного типа. На рис.2(а) показан пример (для $I=3$), когда за УВ каждого типа закрепляется один фиксированный радиоканал. На рис.2(б) – пропускная способность каждого радиоканала в равных долях распределяется между УВ всех типов (для $I=3$).

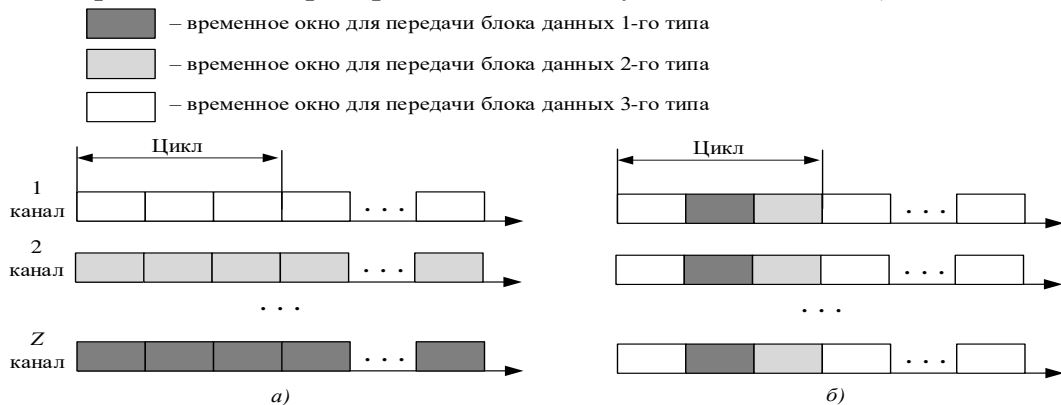


Рисунок 2 – Распределение радиоканалов между УВ разного типа

В исследовании предлагается использовать более общий, регулируемый множественный доступ, в соответствии с которым любая УВ имеет доступ к любому радиоканалу, а пропускная способность каждого радиоканала разделяется между УВ в неравных долях, что позволяет обеспечивать разное качество обслуживания для трафика разного типа. УВ каждого типа выделяется различное число временных окон в каждом цикле. N_i – количество временных окон, которые доступны умным вещам i -го типа ($i=1,2,\dots,I$).

Если УВ одного типа допускают большую временную задержку при передаче блока данных, чем УВ другого типа, то в цикле им выделяется меньшее число временных окон. Закрепление временных окон за вещами разного типа должно осуществляться таким образом, чтобы использовались все временные окна.

На рис.3 ниже показан пример организации структуры цикла передачи при использовании регулируемого синхронно-временного множественного доступа для случая $N=12$, $I=3$, $N_1=2$, $N_2=4$, $N_3=6$. Подобный подход позволяет гибко делить общий ресурс радиоканалов в сети последней мили между УВ.

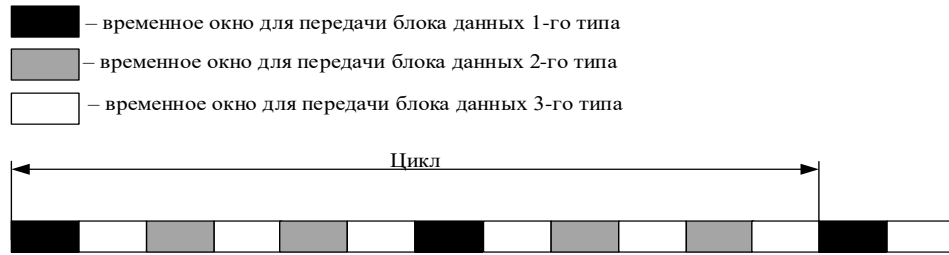


Рисунок 3 – Структура цикла передачи при использовании регулируемого синхронно-временного множественный доступ

Описывается сценарий доступа к ресурсам сети на последней миле, использующий двухфазную модель обслуживания потоков неоднородных данных, поступающих от разнотипных УВ. На 1-й фазе предусматривается адаптивное ограничение объема поступающего на обслуживание трафика. Возможны два варианта организации регулирования на 1-й фазе: обслуживания с явными потерями и обслуживания с ожиданием. Рассмотрен подробнее первый вариант режима – с явными потерями блоков данных, поступающих для передачи, в случае отсутствия свободных каналов в сети. На 2-й фазе обслуживания осуществляется передача блоков данных от УВ разного типа согласно с предложенным алгоритмом регулируемого синхронно-временного множественного доступа.

Получена модель массового обслуживания, описывающая процесс передачи данных от УВ различных типов в виде двухфазной СМО, позволяющая оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов.

Математическая модель. *I-я фаза*

P_i – вероятность блокировки блока данных от УВ i -го типа на первой фазе из-за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе. Вероятность P_i рассчитывается по первой формуле Эрланга:

$$P_i = \frac{A_i^{Y_i}}{Y_i!} \left[\sum_{n=0}^{Y_i} \frac{A_i^n}{n!} \right]^{-1}, i = 1, 2, \dots, I.$$

Математическая модель. *II-я фаза*

$B_i(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) времени передачи блока данных i -го типа УВ ($i = 1, 2, \dots, I$):

$$B_i(s) = e^{-s \frac{N}{N_i} T_{ок}}.$$

$W_i(s)$ – ПЛС времени ожидания начала передачи блока данных от УВ i -го типа:

$$W_i(s) = \frac{s(1-\rho_i)}{s-\lambda_i + \lambda_i B_i(s)}.$$

ρ_i – загрузка среды передачи блоками данных i -го типа ($i = 1, 2, \dots, I$):

$$\rho_i = \lambda_i \cdot T_{ок} \frac{N}{N_i}.$$

Вероятностно-временные характеристики процесса обслуживания заявок.

Среднее время задержки передачи блоков, поступающих от УВ i -го типа:

$$\bar{t}_i = \frac{\frac{N}{N_i} T_{ок} (\rho_i - 2)}{2(\rho_i - 1)}.$$

Вероятность своевременной доставки блоков, поступающих от УВ i -го типа:

$$Q_i = \frac{\frac{1}{T_i}(1-\rho_i)}{\frac{1}{T_i} - \lambda_i + \lambda_i e^{-\frac{1}{T_i} \frac{N}{N_i} T_{ок}}} e^{-\frac{1}{T_i} \frac{N}{N_i} T_{ок}},$$

Предлагается протокол регулируемого множественного доступа к радиоресурсам сети интернета вещей на последней миле. Протокол принимает во внимание свойства и качества, часто проявляющиеся в практически значимых киберфизических системах: разнообразие поддерживаемых приложений и, как следствие, неоднородность передаваемого трафика, сверхплотность, т. е. высокая концентрация узлов сети, потребность в экономном расходовании физических ресурсов компонентов сетей (например, энергии).

На основе модели были разработаны методы расчета вероятностно-временных характеристик, количественно описывающих процесс передачи в беспроводной среде сообщений, генерируемых различными типами умных вещей: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, информационной скорости реального времени. Методы расчета характеристик легли в основу программы, которая позволяет рассчитывать, визуализировать и анализировать влияние параметров регулируемого множественного доступа на вероятностно-временные характеристики процесса передачи в неоднородной БСС.

В третьей главе рассмотрено имитационное моделирование информационного взаимодействия в интернете вещей. В данной главе рассматривается имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей, разработанная на основе построенной ранее аналитической модели.

Имитационная модель БСС была реализована в среде AnyLogic и при её разработке были учтены особенности множественного доступа с синхронно-временным доступом к эфирной среде передачи. Имитационная модель представлена на рис.4 и включает в себя модули: Заявки – поток заявок, поступающих в системе, Очередь – очередь заявок, ожидающих прием заявок в системе, Агрегат – устройство обрабатывающие поток заявок, Конец – конечная точка заявок.

Для измерения показателей в модели были добавлены timeMeasureStart – начало периода измерения, timeMeasureEnd – конец периода измерения. Если заявка не дожидается приема, то очередь может ее отбросить в Sink (конец).

При разработке имитационной модели за основу взята система множественного доступа с синхронно-временным доступом к эфирной среде передачи, которая может быть представлена системой массового обслуживания $M/D/1$.

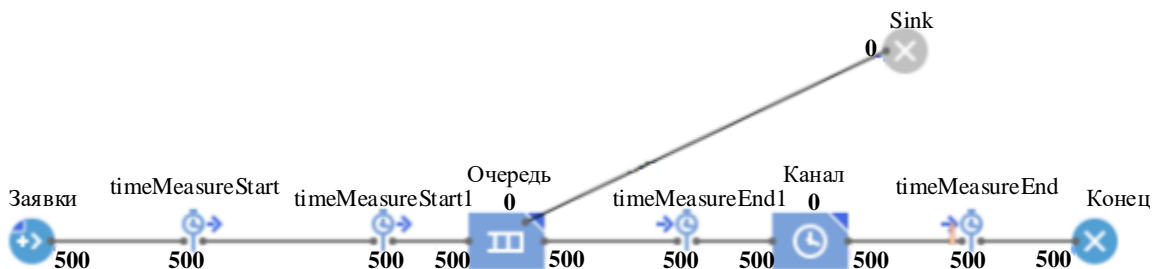


Рисунок 4 – Имитационная модель

Интенсивность прибывания сообщений на обслуживание: распределение Пуассона

Имитационная модель позволяет описать объекты информационного взаимодействия интернета вещей и может применяться для проведения разнообразных экспериментов в целях проектирования, анализа и оценки работы БСС интернета вещей. В отличие от аналитического решения, в результате которого были получены формулы и рассчитаны вероятностно-временные и вероятностно-энергетические характеристики, имитационная модель позволит чётко определить, какие параметры влияют на моделируемую систему и как эти параметры связаны друг с другом.

Имитационная модель БСС была реализована в среде AnyLogic и при её разработке были учтены особенности множественного доступа с синхронно-временным доступом к эфирной среде передачи, используемого для передачи сообщений умными вещами. В подобной модели очереди прибытия являются марковскими, имеют общее распределение и для них существует 1 обслуживающий прибор. В качестве результата работы программа предоставляет вероятностно-временные характеристики для анализа модели $M/D/1$, такие как: количество заявок в очереди, среднее время пребывания заявки в ней, число заявок, которые покинули систему и среднее время нахождения заявок в системе в целом.

Дальнейшее развитие исследований на базе разработанной имитационной модели проводилось в следующих направлениях:

1. Рассмотрена многоканальная эфирная среда передачи – $M/D/N$. Рассмотрены случаи двух (см. рис.5) и пяти канальной среды передачи.

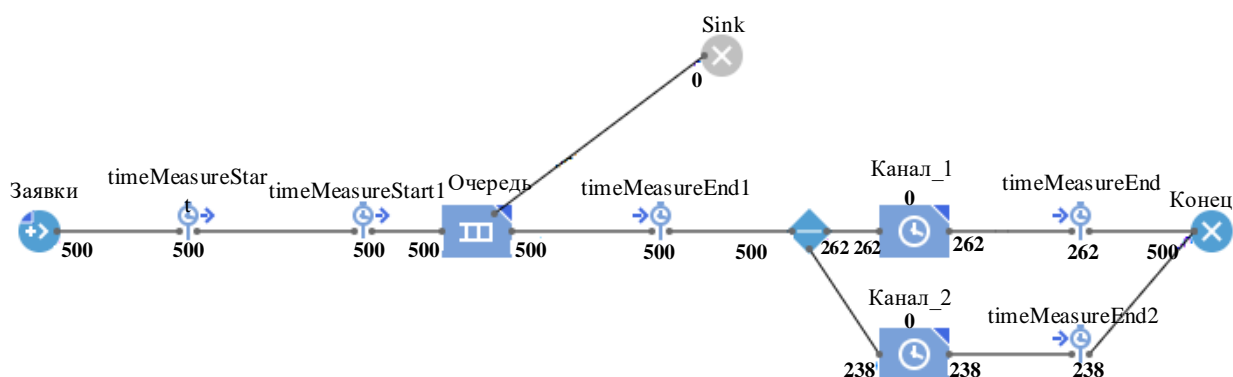


Рисунок 5 – Имитационная модель.

Многоканальная эфирная среда передачи данных ($M/D/2$)

2. Проводилось имитационное моделирование системы доступа к ресурсам беспроводной сенсорной сети (каналу передачи) с использованием относительных приоритетов (k – число приоритетов). Приоритетное обслуживание в беспроводной сети осуществляется следующим образом: все сенсорные узлы опрашиваются и сначала передаются сообщения с самым высоким k -ым приоритетом, если таких нет, то передаются сообщения с $k-1$ -ым приоритетом и так далее.

Разработанная имитационная модель позволяет определять влияние числа приоритетов на производительность беспроводной сети, которую предлагается оценивать информационной скоростью реального времени сети $R_{РВ}$ (бит/с). На рис.6 показана физическая схема передачи сообщений с тремя приоритетами.

Для определения влияния процедуры приоритетной передачи на продуктивность беспроводной сети на имитационной модели проводился ряд экспериментов. При этом изменялись параметры сети: интенсивность передачи и длина передаваемых сообщений, число приоритетов, допустимые времена обслуживания сообщений разных приоритетов и пр.

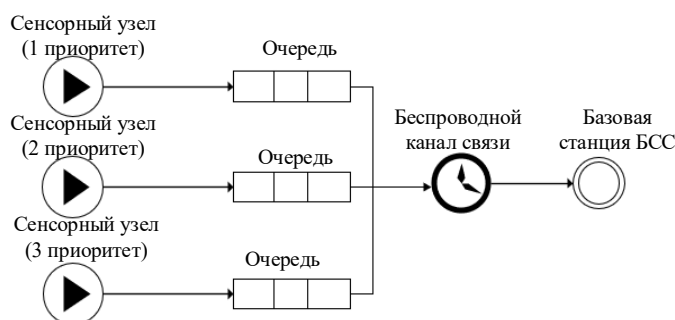


Рисунок 6 – Физическая схема передачи сообщений с приоритетами

Результаты проведенных экспериментов позволяют рассчитать значение информационной скорости реального времени беспроводной сети, построить графики её зависимости от различных параметров (интенсивность передачи сообщений, число приоритетов и др.), а также оценить влияние исследуемых параметров на производительность сети.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов проведенных с применением аналитических моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей, результаты экспериментов имитационных моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей. Также было проведено сопоставление результатов экспериментов.

Предложенные в главе 2 формулы позволяют, в частности:

1) провести численные эксперименты и по их результатам построить графики зависимостей рассматриваемых характеристик процесса доставки блоков данных в беспроводной сети IoT. На рисунке 7 частично представлены результаты расчетов.

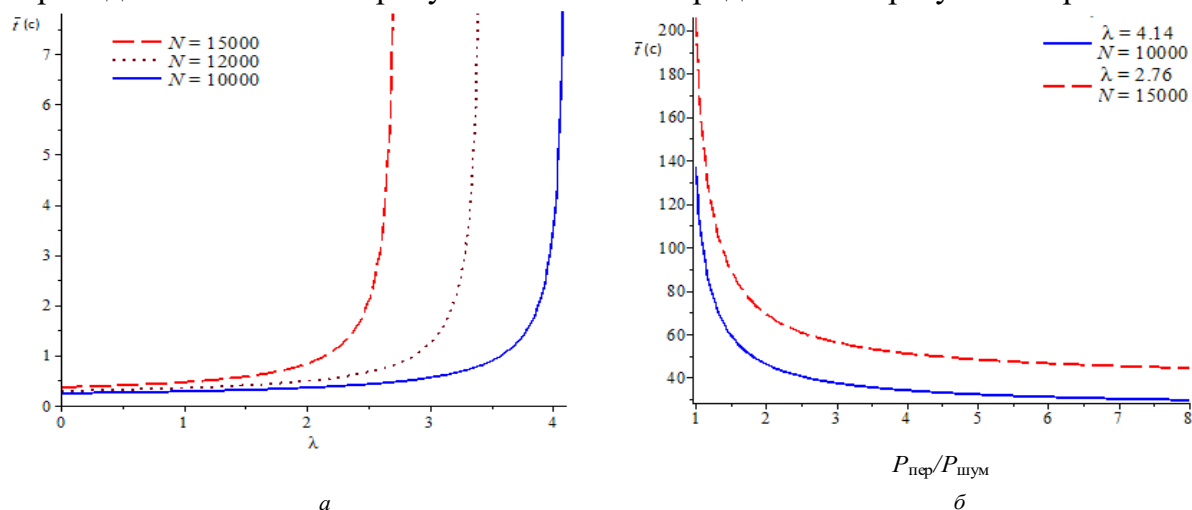


Рисунок 7 – Графики зависимости среднего времени доставки сообщений от:
а) интенсивности передаваемых сообщений, б) от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$

Для апробации предложенных методик расчета характеристик проводились соответствующие расчеты. Исходные данные для численных экспериментов: частота передающего радиосигнала $B = 2,4$ ГГц; количество сенсорных узлов в сети $N = 10\,000, 12\,000, 15\,000$; длины передаваемых кадров $n_k = 256$ бит; длины подтверждающих передачу квитанций $n_{\text{кв}} = 16$ бит.

2) провести расчет средней энергии, которая тратится на передачу блока данных в беспроводной среде к ближайшему, ко второму и к третьему по расстоянию сенсорным объектам. Результаты численных экспериментов показаны на рис.8.

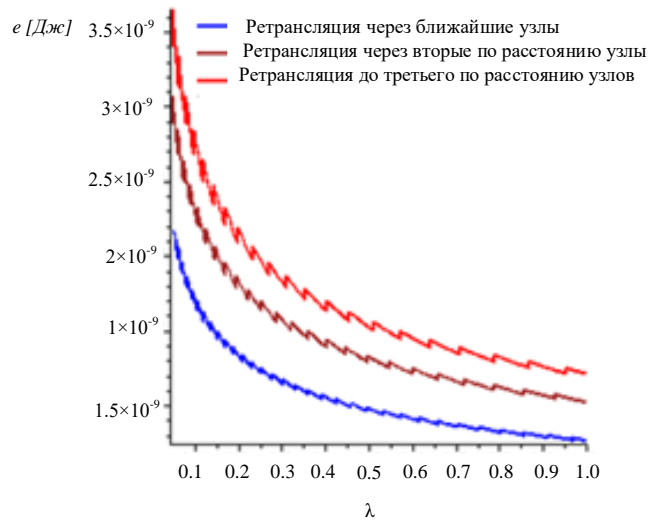


Рисунок 8 – Зависимость энергопотребления сенсорных устройств от плотности сенсорного поля

3) рассчитать вероятностно-временные характеристики передачи блоков данных от УВ трех типов (т. е. $I = 3$) в беспроводной сенсорной сети интернета вещей. Исходные данные для расчетов: $Z = 2$, $N_1 = 1$, $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $k = 1024$ [бит], $V = 210000$ [бит/с], $q_1 = \frac{1}{15}$, $q_2 = \frac{1}{3}$, $q_3 = \frac{3}{5}$, $T_1 = 0,1$ [с], $T_2 = 0,3$ [с], $T_3 = 0,6$ [с].

Частично результаты численных экспериментов показаны на рис. 9. На рис. 9(а) показана зависимость вероятностей блокировки блоков данных на первой фазе от интенсивности их поступления от УВ всех типов. Рис. 9(б) – зависимость интенсивности поступления блоков данных на вторую фазу от интенсивности поступления блоков данных на первую фазу.

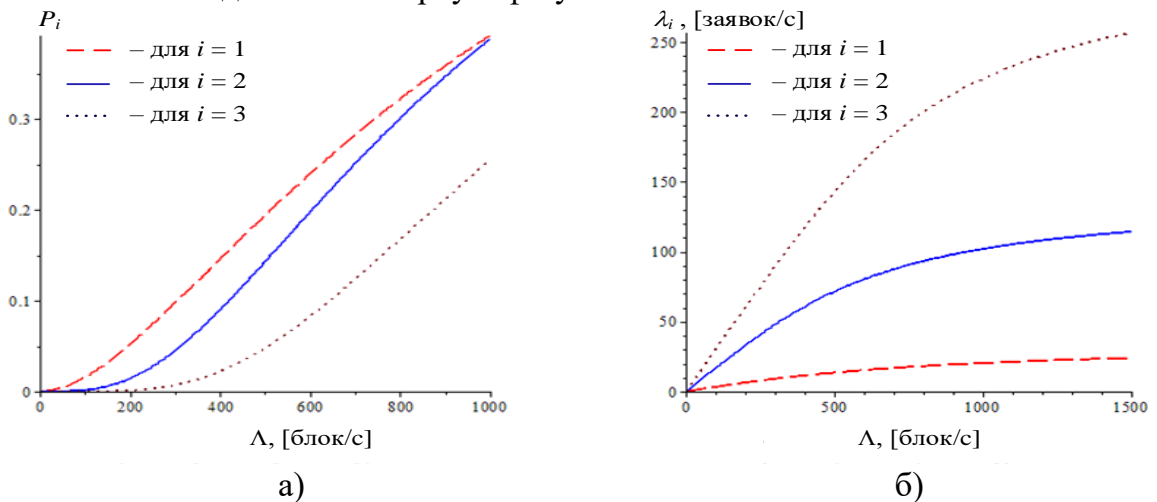


Рисунок 9 – Результаты численных экспериментов. Зависимости:

а) вероятностей блокировки блоков данных на 1-ой фазе от интенсивности их поступления от УВ всех типов; б) интенсивности поступления блоков данных на 2-ую фазу от интенсивности поступления блоков данных на 1-ую фазу

Для сравнения результатов имитационного моделирования с результатами численных экспериментов на базе разработанной ранее аналитической модели построены следующие графики:

– рис.10 – зависимость среднего времени доставки сообщений от интенсивности входного потока сообщений и от отношения мощностей $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$;

Анализ графиков (рис. 10) характеристик информационного взаимодействия показал состоятельность разработанной имитационной модели.

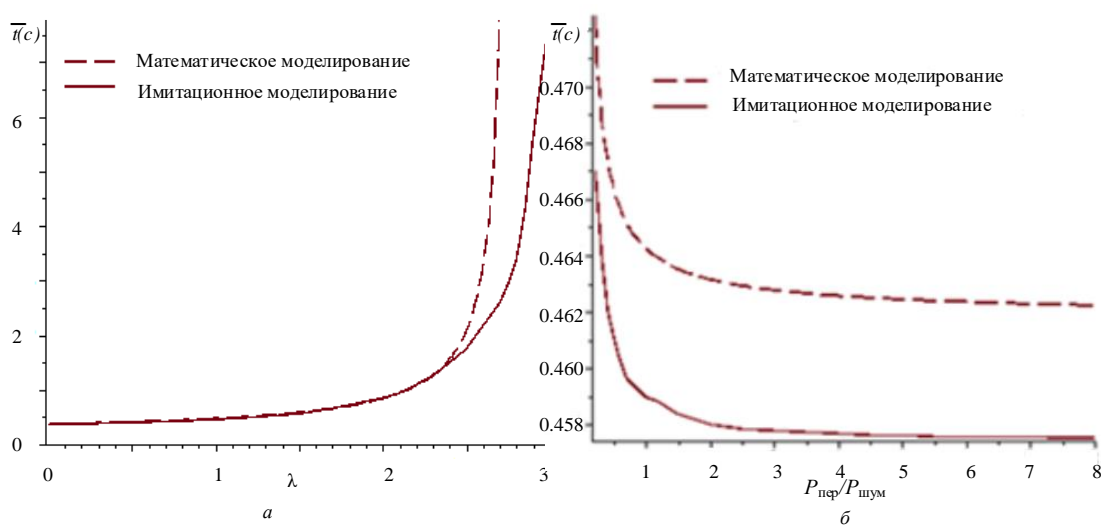


Рисунок 10 – Графики зависимости среднего времени доставки сообщений: а) от интенсивности сообщений, б) от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$

Из графика, представленного на рис. 10(а), видно, что согласно численным расчетам, проведенных на базе математической модели, рост интенсивности сообщений ведет увеличению среднего времени доставки сообщений в БСС и сеть теряет эргодичность при интенсивности сообщений равной $\sim 2,5$ [сооб/с]. График, соответствующий имитационному моделированию, имеет схожий характер: при интенсивности потока входных сообщений от 0 до 2 [сооб/с] графики совпадают – идет незначительное увеличение среднего времени доставки сообщений, а затем, при $\sim 2,7$ [сооб/с] начинается существенный рост этого показателя и наблюдаются отклонение от графика, полученного из численных экспериментов на математической модели. В частности, рабочий диапазон интенсивности увеличивается.

На рисунке 10(б) показаны графики зависимости среднего времени доставки от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$ построенные по результатам численных расчетов на базе математической модели и по результатам проведения имитационных экспериментов. Оба графика имеют похожий характер, но имитационные эксперименты показали меньшее среднее время задержки (\sim на 15 мс) на всем исследуемом диапазоне отношения мощностей $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$. Следует отметить, что рост отношения мощностей $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$ позволяет заметно улучшить качество обслуживания в БСС. В частности, он значительно уменьшает среднее время доставки сообщения в сети.

В приложении представлены примеры практического использования результатов исследований.

В заключении делаются выводы по результатам проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках проведенных диссертационных исследований получено решение важной научно-технической задачи: разработки моделей и методов оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей. Важные новые результаты работы:

1. Проведен анализ особенностей функционирования сенсорных сетей интернета вещей, который позволил в качестве показателей качества информационного взаимодействия выделить совокупность вероятностно-временных, вероятностно-

энергетических и вероятностно-пространственных характеристик, что дает возможность формулировать комплексные критерии оценки качества функционирования сенсорных сетей на начальных этапах их проектирования.

2. Математическая модель оценки энергетических характеристик информационного взаимодействия в эфирных сетях, которая отображает взаимовлияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических свойств информационных взаимодействий умных вещей в беспроводной среде передачи и позволяет найти баланс между затратами энергии на организацию взаимодействия и качеством обслуживания пользователей.

3. Модель оценки энергетических характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве обосновывает выбранные показатели для оценки характеристик энергопотребления сенсорных устройств в трехмерном пространстве и предлагает методы для оценки этих показателей. Разработанные методы могут быть полезны при проектировании сетей интернета вещей при выборе их параметров с учетом специфики предметной области.

4. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей позволяет оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов с учетом процедур регулирования доступа. Методы расчета вероятностно-временных характеристик могут быть востребованы при анализе гетерогенных беспроводных сенсорных сетей интернета вещей.

5. Разработан комплекс имитационных моделей информационного взаимодействия в интернете вещей. Имитационные модели позволяют описать объекты информационного взаимодействия интернета вещей и могут применяться для проведения разнообразных экспериментов в целях проектирования, анализа и оценки работы сенсорной сети интернета вещей. Комплекс моделей информационного взаимодействия включает: модель в одноканальной среде передачи; модель в многоканальной среде передачи; модель с неоднородными сенсорными узлами с использованием относительных приоритетов в обслуживании.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романова А.А., Шамин А.А. Модель цифрового сельского хозяйства // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 12. С. 63–69.

2. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В. Оценка энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях //Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 10. С. 34–38.

3. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 10. С. 20–27.

4. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А. Показатели эффективности процесса взаимодействия в сети Интернета вещей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022 Т. 15, № 3. С. 5–14.

5. Романова А. А. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022 Т. 15, № 8 С. 69–76.

Публикации, включенные в базу Scopus:

6. Tatyana Astakhova, Mikhail Kolbanev, Anna Romanova. Energy Consumption of Sensor Devices in Three-dimensional Space of Agricultural Land. В сборнике: CEUR

Workshop Proceedings MICSECS 2019 – Proceedings of the 11th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems, Saint Petersburg, Russia, December 22-23, 2019. © 2020. CEUR-WS.org/vol-2590/paper13.pdf.

7. Verzun, N. Two-phase model of information interaction in a heterogeneous internet of things network at the last mile / N. Verzun, M. Kolbanev, A. Romanova // CEUR Workshop Proceedings: 12, St. Petersburg, 10–11 декабря 2020 г. – St. Petersburg, 2020.

Свидетельства государственной регистрации программ:

8. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романова А.А., Шамин А.А. Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ECMAN) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666925, 17.12.2019. Заявка № 2019665698 от 02.12.2019.

9. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А. Программа расчета характеристик 2-ух фазной системы множественного доступа с явными потерями на 1-ой фазе (MASWOLFP) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2020664458, 13.11.2020. Заявка № 2020660132 от 09.09.2020.

10. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Мещеряков Е. Е. Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОБВХПСВД) // Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2022617589, 22.04.2022. Заявка № 2020660132 от 18.04.2022.

Работы, опубликованные в сборниках трудов Международных и Российских конференций:

11. Колбанёв М.О., Романова А.А. Анализ особенностей цифрового сельскохозяйственного производства // Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом – реалии, возможности, перспективы. III Всероссийская научно-практическая конференция, Княгинино. 2018 г. С. 186–189.

12. Колбанёв М.О., Романова А.А. Цифровая экономика // Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований материалы и доклады XXIII Международной научно-практической конф. Княгинино. 2018. С. 204–206.

13. Колбанёв М.О., Романова А.А. О построении умного поля // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий материалы IV межрегиональной научно-практической конференции. Севастопольский государственный университет; под науч. ред. Б.В. Соколов. Севастополь, 2018. С. 77–78.

14. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романов А.А. Умное сельскохозяйственное поле на основе интернета вещей // Региональная информатика и информационная безопасность. Сб. трудов. Вып. 5 / СПОИСУ. СПб., 2018 г. С. 201–202.

15. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В.. Лабораторная работа «Оценка энергетических характеристик интернета вещей» // Современное образование: содержание, технологии, качество. Материалы XXV междунар. научно-методической конф. Санкт-Петербург, 23 апреля 2019 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019 С. 359–361.

16. Романова А.А. Использование информационных систем управления для мониторинга состояния объектов растениеводства, животноводства и окружающей среды // ИБРР-2019. XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. СПб., 2019. С. 199–201.

17. Верзун Н.А., Воробьев Д.М., Колбанёв М.О., Романова А.А. Энергетический аспект безопасности систем радиочастотной идентификации // ИБРР-2019.

XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. – СПб., 2019. С. 275–276.

18. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В. Изучение методов повышения энергоэффективности объектов инфокоммуникаций с автономным электропитанием в рамках дисциплины инфокоммуникационные системы и сети // ИБРР-2019. XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. – СПб., 2019. С. 509–510.

19. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романова А.А. Взаимовлияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик беспроводных сенсорных сетей // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы V межрегиональной научно-практической конф. Севастополь, 24-28 сентября 2019 г. – Севастополь: СевГУ, 2019. С. 241–242.

20. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романова А.А. Энергетическая безопасность всепроникающих сенсорных сетей // XVII Санкт-Петербургская международная конференция РИ-2020. Материалы конференции. СПб, 28-30 октября 2020 г. Часть 1. С.120–121.

21. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В., Двухфазная модель множественного доступа к инфокоммуникационным ресурсам // XVII Санкт-Петербургская международная конференция РИ-2020. Материалы конференции. СПб, 28-30 октября 2020 г. Часть 1. С. 66–67.

22. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Цехановский В.В., Романова А.А. Использование пакета Maple при проведении лабораторного практикума по дисциплине «Инфокоммуникационные системы и сети» // Современное образование: содержание, технологии, качество. Материалы XXVI междунар. Научно-методической конф. СПб, 29 сентября 2020 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020 С. 186–187.

23. Astakhova T., Kolbanev M., Romanova A. Estimation of the sensor devices characteristics in three-dimensional space of agriculture //В сборнике: The Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems. 2020. С. 154–157.

24. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А., Цехановский В.В. Использование в учебном процессе программы расчета характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2021. Т. 1. С. 239–241.

25. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Романова А.А. Модель управления ресурсами взаимодействия кибертехнических систем ресурсов // XII Санкт-Петербургская межрегиональная конференция ИБРР-2021, СПб, 27-29 окт. 2021. С. 210–211.

26. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Романова А.А. Имитационное моделирование информационного взаимодействия кибертехнических систем ресурсов // XII Санкт-Петербургская межрегиональная конференция ИБРР-2021, СПб, 27-29 окт. 2021. С. 211–212.