Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

На правах рукописи

Re

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

Диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель к.т.н., доцент Верзун Наталья Аркадьевна

Санкт-Петербург 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ12
1.1. Общая характеристика сквозных технологий
1.2. Интернет вещей и его особенности
1.3. Характеристики процессов информационного взаимодействия в
интернете вещей
1.4. Постановка задачи исследования
ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ
2.1. Задачи моделирования
2.2. Оценка энергетических характеристик множественного доступа в
эфирных сетях
2.3. Оценка энергетических характеристик сенсорных устройств в
трехмерном пространстве41
2.4. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета
вещей
2.5. Выводы по главе
ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ57
3.1. Имитационное моделирование
3.2. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете
вещей61
3.3. Выводы по главе

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ71
4.1. Программы ЭВМ для оценки вероятностно-энергетических
характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей 71
4.1.1. Программа расчета характеристик двухфазной системы
множественного доступа с явными потерями на первой фазе
(MASWOLFP)71
4.1.2. Программа расчета энергетических характеристик множественного
доступа в эфирных сетях (ECMAN)80
4.1.3. Имитационная модель оценки вероятностно-временных
характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ
ОВВХПСВД)
4.2. Результаты экспериментов аналитических моделей оценки
вероятностно-энергетических характеристик информационного
взаимодействия в интернете вещей
4.2.1. Результаты численных экспериментов модели процесса
функционирования беспроводной сенсорной сети интернета веще 86
4.2.2. Результаты оценки энергетических характеристик сенсорных
устройств в трехмерном пространстве
4.2.2. Результаты численных экспериментов модели регулируемого
множественного доступа в сети интернета вещей
4.3. Сопоставление результатов экспериментов моделей оценки
вероятностно-энергетических характеристик информационного
взаимодействия в интернете вещей
4.4. Выводы по главе
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ109
СПИСОК ПИТЕРАТУРЫ 110

ВВЕДЕНИЕ

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. Сегодня уже 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 следующее:

- они имеют автономное питание;
- они подвижны и могут менять свое положение в пространстве;
- они взаимодействуют с внешним окружением по радиосетям;
- они могут выполнять функцию не только рабочих станций. Сенсорное устройство может быть транслятором, и, соответственно, может выполнять функцию ретрансляции сообщений от других сенсорных устройств.

сети ІоТ возникает проблема При создании В организации взаимодействия устройств друг с другом, принимающей во внимание совокупность вышеперечисленных особенностей. Для решения данной проблемы актуальным является создание моделей информационного взаимодействия в интернете вещей, 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.

процессе своего функционирования Любая сеть электросвязи в потребляет физические ресурсы. К физическим ресурсам относят пространственные, временные и энергетические ресурсы. При создании эксплуатации инфраструктурных (фиксированных) сетей, таких телефонные сети общего пользования, основное внимание например, уделялось разработке моделей, которые позволяли бы оценивать вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных, то есть 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 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 проработанности 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. Вишневский, 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 относят 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 вероятностноэнергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.
- 3. Разработаны имитационные модели для оценки вероятностноэнергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.
- 4. Разработаны методы оценки вероятностно-энергетических характеристик взаимодействия в интернете вещей.

Объект исследования: беспроводные сенсорные сети интернета вещей.

Предметом исследования являются процессы информационного взаимодействия в интернете вещей.

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

- 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. Вывод: в качестве характеристик сенсорных сетей необходимо рассматривать вероятностно-энергетические характеристики.
- 2. Комплекс аналитических моделей информационного взаимодействия в беспроводной сенсорной сети интернета вещей.
- 3. Модель оценки энергетических характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве.
- 4. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей.
- 5. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей.

Научная новизна работы заключена 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 беспроводных сенсорных сетей IoT.

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

- обоснованным применением моделей и методов оценки вероятностноэнергетических 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) // Свидетельство 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) // Свидетельство 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) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022617589, 22.04.2022. Заявка № 2020660132 от 18.04.2022.

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

Международная научно-практическая конференция «Социальноэкономические проблемы развития муниципальных образований». Княгинино. 2018 г.

Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика», Санкт-Петербург, 2018, 2020 г.

Международная научно-методическая конференция «Современное образование: содержание, технологии, качество», Санкт-Петербург, 2019, 2020, 2021 г.

The Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems, Russia, 2019, 2020.

Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные направления развития техники и технологий в России и за рубежом — реалии, возможности, перспективы», Княгинино, 2018 г.

Межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». Севастопольский государственный университет; под науч. ред. Б.В. Соколов. Севастополь, 2018, 2019.

Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России», Санкт-Петербург, 2019, 2021, 2022.

Публикации. Всего по теме проведенных исследований было опубликовано 26 печатных работ, из них 5 статей публиковались в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях индексируемых в базе SCOPUS, имеется 3 свидетельства государственной регистрации программ.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

1.1. Общая характеристика сквозных технологий

«Сквозные» технологии — это ключевые направления национальной технологической инициативы — программы поддержки развития перспективных отраслей [12, 19, 62].

Разработка перспективных «Сквозных» цифровых технологий и проектов по их внедрению является одним из основных федеральных проектов национальной программы «Цифровая экономика 2024». Проект представляет собой создание девяти дорожных карт по различным направлениям сквозных цифровых технологий. Это позволит проанализировать существующие современные технологии, выявить преимущества и недостатки новейших ИТрешения и определить траекторию дальнейшего развития отраслей экономики и государства в целом. Премьер-министр России в 2017 году утвердил список ключевых сквозных цифровых технологий: больших данных, нейротехнологий и искусственный интеллект, системы распределенного реестра, квантовые технологии, новые технологии производства, промышленный Интернет, робототехника компоненты И датчиков, технологии беспроводной связи, технологии виртуальной и дополненной реальности [12, 19, 62].

Из дорожных карт «сквозной» цифровой технологии (СЦТ) [18] выделено, что искусственный интеллект может быть применен к реализации новых возможностей человека во всех сферах деятельности, в том числе для: освободить человека от монотонной работы за счет автоматизации процессов, создания программное обеспечение; поддержка при принятии решения; автоматизация опасных видов работ; поддержка общения между людьми [12].

Установлено, что использование искусственного интеллекта необходимо во всех экономических и социальных аспектах для улучшения качества жизнь и улучшать благосостояние общества.

Формулировки понятий выделенных в качестве примеров современных сквозных цифровых технологий приняты условно в качестве постановочных для проведения аналитических исследований и будут сформулированы и обоснованы по результатам проведенных исследований.

что под большими данными Условно укрупнённо принято, большие первоначальном исследовании понимаются массивы информационных данных с достаточно большим разнообразием форм их представления, которые могут иметь или не иметь оформленную структуру и которые могут обрабатываться программными средствами с горизонтальным масштабированием; трудно структурируемые традиционным К структуризациям форматов для широко применимых баз данных; данные постоянной оперативной обновляемости; с извлечением данных из множества разнообразных хранилищ; что приводит к необходимости технической доработки применяемых средств вычислительных и коммуникационных технологий [66].

Аналогичным образом для определения нейротехнологии условно взято определение как: набор технологических методов, основанных на принципах работы нейросети с применением математических моделей, построенных по принципу биологических нейронных сетей, способных к самообучению [84].

Технологии поддерживают интеллект в принятии решений менеджерами

Технологии интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений с применением искусственного интеллекта подразумевают организацию И реализации технологий ПО форме коммуникационного взаимодействия в большей степени приближенных к естественной коммуникации человека и коллективов пользователей с

интеллектуальными техническими системами, интеллектуальными компьютерными программами, с обучением, принятием решений, выработкой рекомендаций, обработкой текстов — на естественном языке [47].

Технологии Блокчейн [49] выделены в обзор сквозных цифровых технологий без применения к сектору финансовых услуг, но как технологии, включающие концепцию организации цепочек блоков, не подключенных к общему серверу, с авторизацией пользователей и доступной информации по доступности файлов блокчейнов, обеспечением безопасности через децентрализованный сервер, адресацией, идентификацией и подтверждением подлинности источника данных и формированием адресных баз данных с проставлением меток одноранговых сетевых соединений [83].

Квантовые технологии как цифровые технологии выделены в самостоятельную категорию как технологии, применяющие квантовые вычисления, квантовую криптографию, квантовые сенсоры, квантовые изображения, квантовые компьютеры.

Категория «Промышленного интернета» [2, 3] выбрана как концепция построения инфокоммуникационных инфраструктур с подключением к сети интернет-оборудования, датчиков, сенсоров, автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с традиционными методами исследования.

В эту специализацию входят научно-технические методы и исследовательское оборудование, модели и конструктивные решения машинно-человекосистемных систем, предназначенные для автоматизации производства и поддержки интеллектуальных процессов управления, обработки данных, необходимых в сферах технологического производства и других сферах человеческой деятельности, связанные с компьютеризацией технологических и производственных процессов, созданием систем поддержки сбора и обработки данных, оперативным управлением всеми звеньями производственного цикла.

Аналитический и вычислительный аппарат специальности достаточно полно поддерживает систему интернета вещей во всех необходимых для его функционирования звеньях и позволяет дополнить аналитическую и вычислительную базу обработкой сигналов и данных с датчиков и других устройств, что является аналогичной современной задачей для категории цифровых технологий – большие данные.

Категория Робототехника для задач организации вычислительных и коммуникационных процедур сквозных цифровых технологий ориентирована на выполнение задач организации взаимодействия объектов исследования с внешней средой без помощи человека. Робототехника использует признанные средства разработки, исследования и практического применения в виде программируемых механических устройств [70].

Категория Сенсорика в настоящее время часто интерпретируется как Сенсорика роботов и имеет тесную связь с категорией Робототехника. Программируемые механические устройства, относимые к категории Робототехника оснащена сенсорными устройствами, в TOM числе с чувствительными сенсорными датчиками для комплексной обработки сигналов, возможностью настройки и регулировки параметров, а также интерфейсами системы управления [13]. Показания датчиков автоматизированных системах управления могут выступать в роли пусковых устройств оборудования и программного обеспечения. Аналитический и вычислительный аппарат Робототехники и Сенсорики роботов включает возможности обработки сигналов и данных с датчиков и других устройств как категорий цифровых технологий Большие задачах ДЛЯ Промышленный интернет и Нейротехнологии – в части применения аппарата исследований в виде нейронных сетей, традиционно применяемых в области робототехники и сенсорике роботов.

Категория Беспроводная связь широко применима во всех современных средствах коммуникационных технологий производственного и бытового

назначения — сотовая связь, беспроводной интернет, Wi-Fi. В современных технологиях на практике широко применимы протоколы передачи данных. По применению технологии Беспроводной связи тесно взаимодействуют с объектами категорий Промышленный интернет, Робототехника, Сенсорика, и не могут быть исключены из совместного рассмотрения категорий цифровых технологий в части доведения информации до объектов обслуживания [55].

В современных системах моделирования, имитационного моделирования широко используются понятия Виртуальной реальности и Дополненной реальности. На высоко технологических уровнях развития систем моделирования и имитационного моделирования представимость объектов, связей и систем такова, что созданный техническими средствами мир Виртуальной реальности убедительно имитирует реальность объектов и субъектов моделирования. Используя сигналы и информацию с сенсорных устройств, компьютерный синтез объектов виртуальной реальности близко приближается к отображению поведения объектов материальной реальности и объекты виртуальной реальности выглядят практически неотличимо от объектов реального мира. В технически развитых компьютерных технологиях применения виртуальной реальности они приближаются к технологиям Дополненной реальности, когда в поле восприятия реальных объектов вводятся и монтируются сенсорные данные, которые дополняют сведения об объектах окружающей среды и улучшают или обостряют восприятие информации об этих объектах. Хорошо известны подобные примеры применения в кинематографии, телевидении, мобильных технологиях, медицине, военной техники, компьютерных играх, обучающих системах. Применение технологий Категорий Виртуальной реальности и Дополненной реальности для систем моделирования и имитационного моделирования наиболее выигрышны при их работе в реальном режиме времени, либо при имитации поведения объектов как в реальном времени в фактически отложенном или предварительном режимах времени.

Отмечено, что квантовые технологии делятся на три основных субтехнологии:

- квантовые вычисления;
- квантовые коммуникации;
- квантовые сенсоры и метрология.

1.2. Интернет вещей и его особенности

Целью многих государств сегодня является развитие четвертой промышленной революции [37], она заключатся в массовом внедрение роботизированных средств в производственные процессы.

На данный момент невозможно представить ни одно современное производство без внедрения средств автоматизации. Внедрение которых повышает точность и скорость производства, при этом снижает воздействие человеческого фактора ошибок связанных c некомпетентностью сотрудников в производственных вопросах. Именно с этим и связана 4 революционная волна производства, которая заключается в автоматизации Наиболее яркими автоматизированными установками. ручного труда примерами являются автоматизированные конвейеры по сборке автомобилей промышленном производстве автоматизированные ИЛИ сельскохозяйственные системы, производящие автоматическую обработку сельскохозяйственных показателей, на основе чего выдаются рекомендации по обработке почвы и выбору взращиваемых культур, но наиболее широкое применение данных систем зарегистрировано в медицине при выполнение сложных операций на внутренние органы, в том числе на сердце и при обучении студентов.

В основе четвертой промышленной революции лежит новый тип «транзисторной» техники. Их революционная способность является следствием «скорости, масштаба и системных последствий технологических изменений». 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 [7].

Четвертая промышленная революция, создавая «умные производства», создает мир, в котором виртуальные и физические производственные системы в глобальном масштабе гибко взаимодействуют друг с другом. Это позволяет полностью настраивать продукты и создавать новые операционные модели.

Однако четвертая промышленная революция касается не только умных и подключенных к сети машин и систем. Её сфера применения намного шире.

Новые технологии охватывают широкий спектр областей, таких как искусственный интеллект (ИИ), робототехника, интернет вещей (IoT), автономный автомобили, 3D-печать, нанотехнологии, биотехнологии, материаловедение, хранение энергии и квантовые вычисления, и это лишь некоторые из них.

По словам Клауса Швабба, эффективный способ лучше понять, что ждет впереди — это применить двусторонний подход, известный как стратегия масштабирования [37]. Для этого нужно:

- иметь минимальное представление о некоторых технологиях,
 оценить их потенциал;
- получить полную картину, понять взаимосвязь между этими технологиями и теми системными изменениями, которые они вызывают.

Интернет вещей называют четвертой волной промышленной революции. Приведем некоторые распространенные способы использования интернета вещей: умное производство, интеллектуальные электросети, умные города, связанная логистика, интеллектуальные цифровые цепочки поставок.

Интернет вещей описывает сеть физических объектов, которые встроены в датчики, программное обеспечение и другие технологии с целью подключения и обмена данными с другими устройствами и системами через

Интернет. Эти устройства варьируются от обычных бытовых предметов до сложных промышленных инструментов [39].

Преимущества интернета вещей распространяются на все сферы жизни и бизнеса. Преимущества, которые он может предложить:

- 1. Улучшенное взаимодействие с клиентами текущая аналитика страдает от «слепых зон» и значительных недостатков в точности. и, как уже отмечалось, взаимодействие остается пассивным. Он полностью преобразует это для достижения более насыщенного и эффективного взаимодействия с аудиторией.
- 2. Оптимизация технологий технологии и данные, которые улучшают качество обслуживания клиентов, также улучшают использование устройств и способствуют более эффективному совершенствованию технологий. Он открывает мир критически важных функциональных и полевых данных.
- 3. Сокращение отходов интернет вещи делает очевидными области, требующие улучшения. Текущая аналитика дает нам поверхностное представление, но интернет вещи предоставляет реальную информацию, ведущую к более эффективному управлению ресурсами.
- 4. Расширенный сбор данных современный сбор данных страдает от своих ограничений и предназначен для пассивного использования. Интернет вещей вырывает его из этих пространств и помещает именно туда, куда люди действительно хотят попасть, чтобы проанализировать наш мир. Это позволяет получить точную картину всего происходящего.

В наше время использование интернет вещей — это привычное дело, почти у всех в доме есть умные вещи. Умные вещи — это устройства, способные беспроводным образом взаимодействовать друг с другом и со своим окружением без вмешательства человека [53]. Умные вещи (датчики) действуют как определяющие инструменты, которые превращают интернет

вещи из стандартной пассивной сети устройств в активную систему возможность интеграции в реальный мир.

Можно привести много примеров использования интернета вещей – умные города, умные дома, считыватели штрих-кодов, носимые устройства, Приведем подключенная система здравоохранения и Т.Π. использования интернета вещей, например в сельском хозяйстве: устройства интернета вещей могут находить погодные условия и данные об окружающей среде с помощью сельскохозяйственных устройств интернета вещей; интернет вещи в силосном складе есть датчики веса, которые обнаруживают утечки и собирают информацию о влажности, влажности и температуре; автоматизация теплиц – это еще один пример использования интернета вещей в сельском хозяйстве, в котором фермеры используют датчики интернета вещей для получения точной информации в режиме реального времени о тепличных условиях. Кроме того, существует управление растениеводством, а также мониторинг и управление скотом, которые помогают сделать сельское хозяйство более продвинутым.

Стремительные преобразование технологий, влияют на нашу жизнь и работу. Технологический прогресс проявляется во многих отраслях, общества и экономики, с последними передовыми разработками умные вещи быстрее проникают в повседневную жизнь.

1.3. Характеристики процессов информационного взаимодействия в интернете вещей

Успешное использование интернета вещей станет важным фактором в работе в настоявшем и будущем нашей жизни [43].

Интернет вещей можно разделить на две основные категории:

- соединение между устройствами;
- подключение устройств к человеку.

Типичным примером соединение между устройствами может быть система удаленного мониторинга для управления или управления интеллектуальным счетчиком для управления электричеством или строительным оборудованием на расстоянии.

Подключение устройства к человеку можно отнести устройства, прикрепленные к запястью или ноге человека для отслеживания количества сожженных калорий или предпринятых шагов. Эти системы в основном построены на основе облачной платформы. Для эффективного управления большим количеством устройств или данных нужна масштабируемая платформа, такая как облако.

Однако облачная платформа — это всего лишь инфраструктура. Необходимы приложения, чтобы заставить систему работать и управлять ею. Для таких задач, как анализ или управление, приложения создаются на облачной платформе. Объединяя таким образом несколько элементов, реализуется интернет вещей.

Интернет вещей включает в себя три элемента устройства, облака и приложения. Данные собираются и передаются через беспроводное соединение с датчиков. Переданная информация затем сохраняется в базе данных или файле в облаке. После этого приложение извлекает сохраненные данные, а затем выполняет необходимые действия с данными, например анализ, моделирование и т.д.

Для передачи данных используется такие ресурсы как: сообщения, протоколы, среда взаимодействия, физический и канальный уровень, интенсивность взаимодействия.

Объединяя физический и цифровой миры для создания интеллектуальной реальности, где устройства взаимодействуют и обмениваются данными без необходимости вмешательства человека, интернет вещей объединяет интеллектуальные устройства для создания связанных систем, которые умнее, чем сумма их отдельных частей. Он направлен на

создание умной реальности, которая обеспечивает аналитику в реальном времени, полезные прогнозы и ощутимую ценность предоставленных данных.

Но интернет вещей — это не просто набор технологий и оборудования, собранных вместе с помощью решений для подключения, чтобы взаимодействовать, обмениваться информацией и предоставлять полезные идеи своим пользователям [73].

Интернет вещей — это следующая ступень интеграции умных вещей по сравнению с технологией М2М [73]. 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, не пригодной для использования с другими целями [29].

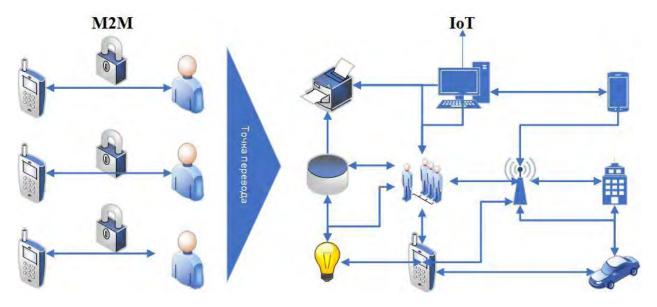


Рисунок 1.1 – Переход от технологий М2М к интернету вещей

Технологии интернета вещей [53]:

- 1. Распознавание отличий одной вещи от другой.
- 2. Для организации взаимодействия между вещами используют всепроникающие сенсорные сети. Основными особенностями технологии являются энергетические и пространственные характеристики.

- 3. Автономная работа умных вещей обеспечивается технологией энергоснабжения.
- 4. Датчики для измерения характеристик объектов и их внешней среды основываются на естественных законов физики, химии, биологии, географии, астрономии и геологии.
- 5. Для обработки данных используются различной степени интеграции электронно-вычислительная машина (ЭВМ).

Все характеристики сетей связи можно разделены на 3 большие группы [9,10]:

- 1. Пространственные это геометрическая мера, определяющая координаты и относительное положение в пространстве пользователей, данных и элементов топологической инфраструктуры.
- 2. Временные это мера сравнения последовательности и частоты (скорости) событий, изменяющих состояние данных и пользователей при информационном взаимодействии.
- 3. Энергетические это мера для оценки усилия, необходимого для перемещения объектов в пространстве и времени при информационном взаимодействии.

Объемы пространственных, временных и энергетических ресурсов, которые необходимы для распространения данных, зависят от используемой информационной технологии.

Пространственные объекты измеряются в единицах длины и расстояния, определяют зону покрытия, размер сети, описывают распределение пользователей и данных в пространстве, топологические свойства структур, образующих сеть, их положение элементов по отношению к друг друга и так далее.

Основной временной характеристикой является время доставки данных — это время, которое начинается, когда данные нужно передать, и заканчивается, когда они доставляются.

Время доставки данных включает 3 составляющие:

- 1) время передачи данных от источника информации к каналу связи. Это зависит от стабильности сигнала и мощности канала. Полоса пропускания канала это максимальная скорость передачи данных, измеряемая в бит/с, т. е. количество сетевых данных, которое может быть передано в единицу времени между двумя терминалами;
- 2) время перемещения сигнала по каналам между сетевыми центрами. Это время у эфирных сетей равно скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, а у проводных сетей заметно меньше;
- 3) время управления движением сигнала в сетевых центрах, таких как маршрутизаторы, серверы или телефонные станции.

Сетевым центрам необходимо получать и анализировать адресную информацию, выбирать пути распространения и запускать другие алгоритмы обработки, тем самым задерживая доставку сигнала.

Особенности инфраструктурных сетей

Принципы построения инфраструктурных (фиксированных) сетей были разработаны в XX веке. В самом общем плане они состоят из:

- первичной сети типовых каналов;
- вторичной сети коммутационных узлов и станций;
- интеллектуальной сети информационного обслуживания.

По мере развития технологий общей частью сетей становились сначала первичная сеть (ЕАСС СССР, ВСС РФ), затем мультисервисная сеть, объединяющая первичную сеть и коммутационные узлы вторичных сетей (ЕАС РФ).

Целью развития сетей связи, построенных в соответствии с этими принципами, были:

в области пространственных характеристик – рост числа пользователей за счет увеличения зоны охвата иерархически

организованными и стационарно располагаемыми станциями и узлами первичной и вторичной сетей;

- в области временных характеристик увеличение пропускной способности первичной сети и скоростей обработки служебных данных во вторичной сети для уменьшения задержек и блокировок при передаче данных;
- в области энергетических характеристик обеспечение бесперебойного питания за счет резервирования систем электроснабжения и аккумуляции энергии непосредственно в станциях и узлах первичной и вторичной сетей связи.

Возможность создания интернета вещей обеспечивают сенсорные сетевые технологии.

Сенсорная сеть — это совокупность интеллектуальных объектов (сенсорных устройств), подключенных друг к другу и к облаку, которые обеспечивают измерение физических параметров окружающей среды [80].

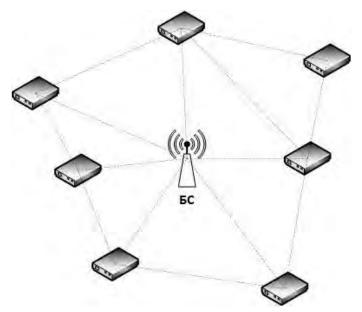


Рисунок 1.2 – Сенсорная сеть

Сенсорная сеть (рис. 1.2) состоит из пространственно-распределенных датчиков и одного или нескольких приемных узлов (также называемых базовыми станциями). Датчики контролируют в режиме реального времени физические условия, такие как температура, вибрация или движение, и

производят сенсорные данные. Узел датчика может вести себя как создатель данных, так и маршрутизатор данных. Приемник, с другой стороны, собирает данные с датчиков.

Сенсорная сеть отличается от стационарной сети инфраструктуры тем, что в качестве терминалов используется множество интеллектуальных объектов, приводит к:

 ряду требований к пространственно-временным характеристикам и энергии сетей в разных регионах.

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.

Существенная взаимозависимость между пространственными, временными и энергетическими характеристиками сети под влиянием внешних условий работы сети.

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

Сенсорные сети называют всепроникающие [11] сенсорные сети (ВСС, англ. USN – Ubiquitous Sensor Networks), поскольку они:

- используются с самыми разными целями, проникая в любые предметные области;
- способны за счет самоорганизации поддерживать работоспособность при изменении состояния предметной области.

Требования к безопасности ВСС отличаются от типичных требований сетей связи следующего поколения (NGN – Next Generation Network). Новыми видами атак являются, например, энергетические атаки (лишение сна, генерация ложных событий, отклонение от предоставления услуг соседям и т.п.) и атаки на маршрутный протокол (создание несуществующих маршрутов, получение данных о топологии, подделка идентификации и т.п.) [15].

В отличии от инфраструктурных сетей, требования к времени доставки данных всепроникающими сенсорными сетями может варьироваться в широких пределах [11].

Требования к задержкам в интернете вещей полностью зависят от вида физических процессов, протекающих в предметной области и фиксируемых датчиками сенсорного поля. Например, опрос датчиков, измеряющих температуру почвы, может производиться один раз в несколько дней, а допустимое время их реакции на сигнал опроса может измеряться секундами.

Тактильный интернет — это система связи, которая обеспечивает тактильное взаимодействие через интернет при помощи роботизированных систем, управляемых с незаметным для человека временем задержки [36].

Тактильный интернет может обеспечивать осязаемую (прикосновение ощущают обе стороны) или неосязаемую обратную связь. В первом случае тактильные приставки должны быть на обоих сторонах сети, во втором – обратная связь представляет собой только аудио или видео сигналы.

В отличии от терминалов инфраструктурных сетей умные вещи являются устройствами с автономными питанием. Поэтому время жизни составленных из них сенсорных сетей зависит от продолжительности работы источников энергии у каждого устройства.

Экономия энергии умных вещей — важный приоритет разработчиков всепроникающих сенсорных сетей.

Энергосбережение обеспечивается аппаратно-программными и системными методами.

Первые связаны с технологиями производства устройств. Необходимо ориентироваться на современной 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, разрабатывать эффективные алгоритмы предварительной обработки данных, стремиться к увеличению периода сна умных вещей и т.д.

Цикл работы умной вещи включает этапы сбора, обработки, приема и передачи данных и сон. Анализ типичного профиля энергопотребления показывает:

- главным потребителем энергии является приемопередатчик;
- энергопотребление на этапах обработки данных в млн. раз меньше в пересчете на 1 бит;
- надо стремиться к предварительной обработке для сокращения объема пересылаемых данных;
 - основная часть жизни вещи должна быть в режиме ожидания.

Системные методы энергосбережения ориентированы на рациональное построение физической среды и алгоритмов взаимодействия умных вещей друг с другом и остальными сетевыми элементами. В основе решений лежат следующие предпосылки:

- свойства среды зависят от радиочастотного диапазона;
- топология сети определяет правила физического взаимодействия элементов сети друг с другом и, поэтому, влияет на уровни сигналов, излучаемых элементами;

- протоколы физического, канального и сетевого уровней должны строиться, исходя из увеличения времени жизни сети в целом (например, протокол маршрутизации EBMR (Energy-Balancing Multipath Routing) основан на энергетической балансировке маршрута и кластеризации которые уменьшает расстояние между взаимодействующими умными вещями;
- дополнительный (служебный) трафик значительно увеличивает энергозатраты умных вещей (например, служебный трафик LTE в разы больше, чем речевой трафик за сутки);
- помехоустойчивое кодирование и квитирование являются энергозатратными процедурами. Возможно, влияние ошибок можно уменьшить за счет повышения уровня излучаемых сигналов или исправления ошибок протоколами верхних уровней;
- сжатие данных относится к числу эффективных механизмов уменьшения энергопотребления умными вещами, благодаря уменьшению числа излучаемых знаков.

Топология сети связи увязывает пространственное расположение сетевых элементов с возможностью осуществления между ними информационного обмена. Следует различать физическую (пространственную) и сетевую топологии [77, 68].

Выбор топологии сенсорной сети зависит от:

- зон расположения элементов сети с учетом их мобильности;
- объема трафика, который они могут обслуживать;
- энергоемкости каждого элемента;
- влияние электромагнитных полей на доставку данных и т.д.

Для сенсорных сетей характерны 3 вида топологии:

1. Топология «звезда» выделяет специальный сетевой элемент – сетевой координатор (узел доступа) – для организации взаимодействия со всеми конечными устройствами и внешней средой. Преимущества этого

подхода проявляются в больших размерах сенсорного поля и относительно низкой плотности устройств.

- 2. Топология дерева кластеров представляет собой иерархическую структуру, в которой мастер-станции формируют кластеры радиодоступных терминалов, собирают с них данные и после предварительной обработки передают данные на базовую станцию.
- 3. В отличие от кластерного дерева, сотовая или ячеистая топология на уровне канала обеспечивает прямое соединение между соседями в пределах радиодиапазона и с другими элементами с помощью ретрансляторов. Разнообразие маршрутов, доступных между каждой парой станций, повышает надежность сети. Координатор может использоваться для связи с внешней средой.

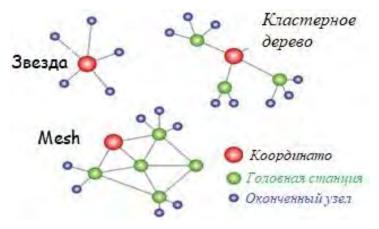


Рисунок 1.3 – Топологии сети связи

Связность всепроникающих сенсорных сетей

Связность — это свойство всепроникающих сенсорных сетей (ВСС), характеризующая передачей данных между элементами сети в пределах границ сенсорного поля в режиме реального времени при заданном уровне заряда батареи устройства.

Связность ВСС зависит и от топологии, и от трафика, и от надежности устройств, и от емкости аккумуляторов автономного электропитания.

Связь может быть прервана:

- обрывы связи при окончании запаса мощности батареи одного из элементов сети;
- ограниченная мощность сигнала на передающей антенне при больших расстояниях между элементами сети, если не может быть гарантирован стабильный радиоприем данных на приемном конце.

Показатели связности. Показатель — это «количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции» [1].

Показателями связности ВСС могут служить следующие вероятностновременные характеристики (ВВХ) процесса информационного взаимодействия умных вещей друг с другом и с головным узлом:

- вероятность связности сети P_S это вероятность того, что передача данных от сенсорного узла умных вещей к головному кластерному узлу возможна. Можно считать ВСС работоспособной (жизнеспособной), если вероятность связности умных вещей больше допустимого значения $P_{S\text{Доп}}$, т.е. когда выполняется условие $P_S > P_{S\text{Доп}}$.
- среднее время доставки блока данных от умных вещей до головного кластерного узла T[c];
- μ -квантиль случайной величины времени доставки блока данных от сенсорного к головному кластерному узлу t_{μ} это значение, которое случайная величина t времени доставки блока данных от умной вещи к головному кластерному узлу не превышает с заданной вероятностью μ .

Связность может быть увеличена за счет перехода через другие умные вещи в кластере. Если умные вещи знают направление к головному узлу, то может быть выбран сектор, ориентированный на головной кластерный узел. Любая умная вещь в этом районе можно использовать как транзитный узел

Энергия, потребляемая сенсорными узлами, существенно зависит от пространственных, и от временных характеристик сенсорных сетей.

Пространственные характеристики влияют на энергопотребление умными вещами, т.к. увеличение расстояния между взаимодействующими

устройствами требует увеличения мощности сигнала на передающей антенне в соответствии с формулой Фрииса:

$$P_{\text{nep}} = \frac{16P_{\text{np}}\pi^2 r^2 f^2}{C_{\text{np}}C_{\text{nep}}c^2}, \gamma = \frac{c}{f}, \qquad (1.1)$$

где $P_{\text{пер}}$, $P_{\text{пр}}$ — мощности сигнала на антеннах передатчика и приемника, соответственно,

c — скорость света, $C_{\rm np}$, $C_{\rm nep}$ — коэффициенты усиления приемной и передающей антенн,

r — расстояние между антеннами, f — частотный диапазон передачи, γ — длина волны.

Используемую для передачи мощность $P_{\text{пер}}$ можно пересчитать в радиус круга — r , в пределах которого может быть выбрана умная вещь для транзита блока данных:

$$r = \frac{\gamma}{4\pi\sqrt{P_{\rm np}}}\sqrt{C_{\rm nep}C_{\rm np}P_{\rm nep}},$$
 (1.2)

Таким образом, мощность, затрачиваемая на передачу сигналов, непосредственно зависит и от размера сенсорного поля, и от плотности размещаемых там устройств.

Временные характеристики, такие как интенсивность информационного обмена и длина передаваемых сообщений, так же влияют на энергопотребление умных вещей, т.к. по мере увеличения количества бит, излучаемых в эфир, растет энергия, затрачиваемая на передачу сообщения. Известно, что энергия, требуемая для излучения 1-го бита примерно в 10^6 раз превышает энергию, требуемую для обработки этого бита в процессоре.

1.4. Постановка задачи исследования

Любая сеть электросвязи в процессе своего функционирования потребляет физические ресурсы. Физические ресурсы – это количественная мера, позволяющая оценить возможность реализации информационного взаимодействия физической средой. К физическим ресурсам относят пространственные, временные и энергетические ресурсы. При создании эксплуатации инфраструктурных (фиксированных) сетей, таких например, телефонные сети общего пользования или пакетные сети Х.25, основное внимание уделялось разработке моделей, которые позволяли бы оценивать вероятностно-временные характеристики, то есть 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 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 свою очередь, зависят от локации участников информационного взаимодействия В интернете вещей, OT 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.

Процесс взаимодействия в интернете вещей сложный и требует специальное управления потому, что есть общая среда. Поэтому при передаче данных возникают задержки, блокировки и. т.д.

Поэтому, актуальной задачей исследования является разработка моделей и методов оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.

Цель исследования: разработка моделей и методов оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.

Для достижения цели исследования требуется решить следующие задачи:

- 1. Провести анализ особенностей процессов информационного взаимодействия в интернете вещей.
- 2. Разработать аналитические модели оценки вероятностноэнергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.
- 3. Разработать имитационную модель оценки вероятностноэнергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.
- 4. Разработать методы оценки вероятностно-энергетических характеристик взаимодействия в интернете вещей.

Выводы по главе

В данной 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.

Выявлено, что описанные особенности функционирования сетей интернета вещей делают актуальную 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.

Был проведен анализ особенностей функционирования сенсорных сетей интернета вещей, который позволил в качестве показателей качества информационного взаимодействия выделить совокупность вероятностновременных, вероятностно-энергетических и вероятностно-пространственных характеристик, что дает возможность формулировать комплексные критерии оценки качества функционирования сенсорных сетей на начальных этапах их проектировании.

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

2.1. Задачи моделирования

Во всех областях, в которых интернет вещи находят широкое применение, важной задачей является управление ресурсами процесса их информационного взаимодействия друг с другом и с внешним окружением. Основным ресурсом, ограничивающим принятие решений при управлении процессами взаимодействия с учетом подвижности взаимодействующих объектов, использования эфирных систем передачи данных, автономного электропитания отдельных систем, большой плотности взаимодействующих систем на ограниченных пространствах, зависимости результатов работы одних систем от поведения других и др. становится энергия.

Таким образом на первый план выдвигаются сложные научные задачи разработки моделей и методов управления процессами информационного взаимодействия в интернете вещей, учитывающие ограничения, связанные с энергопитанием.

Сеть беспроводных интернета вещей объединяет датчиков объекты обмена интеллектуальные cавтономным питанием ДЛЯ информационными сообщениями друг с другом. Срок службы или производительность такой сети зависит от энергоемкости аккумуляторов интеллектуальных объектов.

В работе проводится анализ особенностей процесса энергопотребления беспроводных сенсорных сетей, выбираются показатели для оценки характеристик энергопотребления, а также предлагаются модели и методы оценки характеристик сенсорных устройств, учитывающие в комплексе такие пространственные, временные и энергетические характеристики сенсорной

сети, как 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 сообщений. Приводятся оценки зависимости вероятностноэнергетических характеристик сенсорных устройств от перечисленных параметров. Представленные модели и методы могут использоваться для решения широкого круга задач, возникающих при разработке протоколов функционирования беспроводных сенсорных сетей.

В работе представлены модели, которые позволяют:

- во-первых, оценивать показатели эффективности, обобщающие вероятностные характеристики, такие, например, как: зона охвата, плотность локации умных вещей, мощность сигналов информационного взаимодействия, остаточный заряд батареи, время доставки сообщений между элементами сети, а также время, затрачиваемое на отдельные этапы процесса передачи сообщений;
- во-вторых, исследовать взаимное влияние вероятностнопространственных, вероятностно-временных и вероятностно-энергетических показателей эффективности процесса информационного взаимодействия друг на друга.

2.2. Оценка энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях

Математическая модель, представляющая процесс функционирования беспроводной сенсорной сети интернета вещей. Данная модель принимает в расчет протоколы функционирования сети, охватывающие 1 и 2 уровень (физический и канальный) модели ОSI. Предложенная математическая модель отображает взаимовлияние вероятностно-временных и вероятностно-

энергетических свойств информационных взаимодействий умных вещей в беспроводной среде передачи и предоставляет возможность найти баланс между затратами энергии на организацию информационного взаимодействия и качеством обслуживания пользователей [24].

Увеличение мощности радиосигнала на выходе передающей антенны умной вещи, с одной стороны, повысит надежность передачи сигнала и позволит добиться улучшения качества обслуживания, но, с другой стороны, может привести к повышению трат энергии умными вещами, и, соответственно, к уменьшению срока их жизни. Для продуктивной работы умных вещей и БСС в целом важно найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии, т. е. подобрать такую мощность радиосигнала, которая обеспечит требуемую скорость доставки сообщения. Исследование взаимовлияния вероятностно-временных и вероятностноэнергетических характеристик БСС — актуальная задача современных инфокоммуникаций, а эффективность ее решения существенно влияет на перспективы внедрения БСС в практику различных сфер деятельности [24].

При моделировании информационного взаимодействия умных вещей в БСС берутся во внимание особенности двух нижних уровней модели ЭМВОС (физического и канального) [24].

На физическом уровне учитываются физические параметры взаимодействия узлов беспроводной сети: число умных вещей -N, расстояние между ними -D [м], B — частота радиоканала [Гц], мощность радиосигнала на передающей и на приемной антенне $-P_{\rm nep}$ и $P_{\rm np}$ [Вт], мощность шума в радиоканале $-P_{\rm mym}$ [Вт] и пр.

Зависимость между $P_{\text{пер}}$ и $P_{\text{пр}}$ задается известной формулой Г.Фрииса (Harald Friis) [82]:

$$\frac{P_{\text{np}}}{P_{\text{nep}}} = C_{\text{np}} C_{\text{nep}} \left(\frac{\gamma}{4\pi D}\right)^2, \tag{2.1}$$

где $C_{\text{пер}}-$ коэффициент усиления передающей антенны, $C_{\text{пр}}-$ коэффициент усиления приёмной антенны, λ длина волны [м] передаваемого радиосигнала.

В соответствии с формулой Шеннона-Хартли пропускная способность радиоканала (C) определяется следующим соотношением:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{nep}}}{P_{\text{mym}}} \right), \tag{2.2}$$

Рассматривается БСС состоящая из однотипных умных вещей, т. е. одинаковы: форматы и длины передаваемых сообщений, требования к качеству их доставки и интенсивность передачи для каждой умной вещи. Входной поток сообщений от каждой умной вещи — пуассоновский с интенсивностью λ [сооб/с].

На канальном уровне определяются: формат и длина передаваемых сообщений, и режимы их передачи [21]. Сообщения передаются в кадрах длиною n_{κ} [бит], каждый кадр содержит метаданные и непосредственно передаваемую информацию длиной k [бит]. Предположим, прямой режим передачи кадров (без переспросов), с передачей в обратном направлении квитанции-уведомления о правильности (или неправильности) приема.

На канальном уровне для разделения общей эфирной среды между умными вещами применяется синхронно-временной метод множественного доступа [21], который предусматривает, что все время использования радиоканала поделено на циклы, а циклы — на временные окна, каждое длительностью $T_{\rm ok}$ [c] по числу передающих умных вещей (т. е. на N окон). В каждом цикле в свое временное окно право на передачу одного кадра имеет только одна определенная умная вещь, если же у нее нет сообщения для передачи — радиоканал простаивает [21], также в длительность временного окна входит время, которое требуется на передачу в обратном направлении (узлу передатчику от узла приемника) квитанции и время, затрачиваемое на

декодирование кадра и квитанции. Окончательная формула для расчета длительности временного окна имеет следующий вид:

$$T_{\text{ok}} = \frac{n_{\text{k}} n_{\text{kB}}}{B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{nep}}}{P_{\text{mym}}} \right)} + t_{pij} + t_{\text{dkk}} + t_{pji} + t_{\text{dkkB}},$$
(2.3)

где $n_{_{\rm KB}}$ — длина квитанции [бит], t_{pij} и t_{pji} — времена распространения сигнала от i-ой станции к j-ой и в обратном направлении соответственно [c], $t_{_{\rm ДКК}}$ и $t_{_{\rm ДКК}}$ — времена декодирования кадра и квитанции [c], в формулу (2.3) входит также пропускная способность канала, которая оценивается по формуле Шеннона-Хартли.

Для оценки выбранных характеристик случайного процесса передачи сообщений в БСС используется система массового обслуживания М/G/1 [30]. для которой известно уравнение Хинчина-Полячека преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) функции распределения времени ожидания обслуживания:

$$W(s) = \frac{s(1-\rho)}{s-\lambda+\lambda\cdot B(s)},$$
(2.4)

где s — параметр ПЛС, ρ — загрузка (вероятность занятости канала передачи: $\rho = \lambda \cdot N \cdot T_{\text{ок}}, \ B(s)$ — ПЛС непосредственно времени обслуживания (в данном случае передачи сообщения), которое при использовании синхронновременного доступа к среде передачи задается следующим соотношением:

$$B(s) = e^{-sNT_{\text{ok}}}. (2.5)$$

Совокупность вышеприведенных выражений (2.2) – (2.5) задает математическую модель процесса информационного взаимодействия узлов в БСС интернета вещей. На основе этих выражений получим формулы для расчета ВВХ процесса передачи сообщений в БСС:

1) среднего времени доставки сообщения [c]:

$$\overline{t} = \frac{N \cdot T_{\text{ok}} \left(\lambda \cdot N \cdot T_{\text{ok}} - 2\right)}{2\left(\lambda \cdot N \cdot T_{\text{ok}} - 1\right)}$$
(2.6)

2) вероятность своевременной доставки сообщения:

$$Q = \frac{\frac{1}{\overline{T}_{\text{доп}}} \left(1 - \lambda \cdot N \cdot T_{\text{ок}} \right)}{\frac{1}{\overline{T}_{\text{доп}}} \cdot \lambda + \lambda \cdot e^{-\frac{1}{\overline{T}_{\text{доп}}} \cdot N \cdot T_{\text{ok}}}} e^{-\frac{1}{\overline{T}_{\text{доп}}} \cdot N \cdot T_{\text{ok}}}.$$
(2.7)

где $\overline{T}_{\text{доп}}$ – среднее допустимое время старения сообщений [c]. Выражение (2.7) представлено для случая стохастического ограничения на допустимое время старения сообщений.

3) информационной скорости реального времени сети [бит/с]

$$R_c^{\text{PB}} = R_c^{\text{OII}} \cdot Q, \ R_c^{\text{OII}} = k \cdot N \cdot \lambda,$$
 (2.8)

где $R_c^{\rm OII}$ — информационная скорость общего применения БСС [бит/c].

В работе построена модель процесса функционирования беспроводной сенсорной сети интернета вещей, которая учитывает протоколы функционирования сети на физическом и канальном уровнях. Модель предполагает, что на физическом уровне передаваемые сигналы подвергаются воздействию белого шума, на канальном уровне используется протокол синхронного-временного множественного доступа узлов к общей среде передачи.

Получены выражения для оценки среднего времени доставки сообщений, вероятности их своевременной доставки и информационной скорости сети реального времени

2.3. Оценка энергетических характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве

Для оценки энергетических характеристик рассматривается беспроводная сенсорная сеть (БСС), которая обеспечивает обмен данными между умными вещами с автономным питанием, распределенными случайным образом в трехмерном пространстве [10].

Задачами работы являются:

- выбор показателей для оценки характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве;
 - разработка модели для оценки этих показателей.

Неотъемлемыми составляющими IT-инфраструктуры цифровой экономики являются проводные и беспроводные сети связи [86]. С учетом масштабов IT-инфраструктуры все характеристики сетей должны быть разделены на три большие группы: пространственные, временные и энергетические. Они измеряются в единицах длины и расстояния, определяют зону покрытия, размеры сети, описывают топологические характеристики структур, составляющих сеть.

Временные характеристики задают меру для сопоставления порядка следования и частоты (скорости) событий, изменяющих состояния данных в процессе информационного обмена между элементами сетей. К их числу относятся интенсивности возникновения тех или иных событий, нагрузка, обслуживаемая теми или иными элементами сетей, времена распространения данных по каналам связи, времена ожидания начала обслуживания и другие случайные величины.

Энергетические характеристики, в свою очередь, задают меру для оценки усилий, которые необходимы для обеспечения движения объектов, таких как сообщения, сигналы биты или блоки данных, в пространстве и во времени в процессе информационного обмена.

Проводные и беспроводные сети отличаются друг от друга с точки зрения потребностей в пространственных, временных и энергетических ресурсах и, соответственно, целевыми показателями их использования. Целью развития проводных сетей связи являются:

в области пространственных характеристик – рост числа пользователей за счет увеличения зоны охвата иерархически организованными и стационарно располагаемыми станциями и узлами сетей;

- в области временных характеристик увеличение пропускной способности сетей и скоростей обработки служебных данных (метаданных)
 для уменьшения задержек и блокировок при передаче сообщений;
- в области энергетических характеристик обеспечение
 бесперебойного питания за счет резервирования систем электроснабжения и аккумуляции энергии непосредственно в станциях и узлах сетей связи.

В отличии от проводных сетей, на потребность в ресурсах интернета вещей существенно влияют специфические свойства беспроводных сенсорных сетей и их терминалов, к числу которых относятся:

- широкий разброс геометрический размеров от долей метров до километров, и способность к масштабированию;
- автономность работы каждого сенсорного 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 радио технологий передачи сигналов;
- широкий диапазон скоростей передачи данных и допустимого времени реакции на происходящие события и др.

Эти особенности определяют состав и целевые значения характеристик беспроводных сетей. Основной пространственной характеристикой является размер сенсорного поля. В отличии от зоны охвата инфраструктурных сетей сенсорное поле может [8]:

- вмещать тысячи устройств, в т.ч. наноустройств, требующих комплексного управления;
- менять линейные размеры, которые зависят от случайных перемещений устройств;

быть как двумерным (сельскохозяйственное поле), так и трехмерным (как ферма или теплица).

От площади или объема сенсорного поля и количества объединяемых устройств зависят все остальные пространственные характеристики.

Математическая модель сенсорного поля представляет собой поле случайных точек – это набор точек, случайно распределенных в пространстве. Плотность поля – это среднее количество точек на единицу площади (объема). Различают плотные и сверхплотные сенсорные поля. Равномерное поле – это поле постоянной плотности.

Во многих приложениях сенсорное поле может быть описано точечным полем Пуассона, обладающим следующими свойствами [8]:

- вероятность появления одной или нескольких других точек в любой области (пространственной) плоскости независимо от количества точек, попадающих в области, не пересекающие его;
- вероятность попадания в две и более точек в основной области мала по сравнению с вероятностью попадания в одну точку.

Число точек пуассоновского поля, попадающих в любую область пространства, имеющего объем S, распределено по закону Пуассона:

$$P_{m} = \frac{a^{m}}{m!}e^{-a}, \ a = S \cdot \lambda, \tag{2.9}$$

где a — математическое ожидание числа точек, находящихся в выбранной области S, λ – плотность распределения сенсорных устройств в объеме.

Расстояние между ближайшими точками пуассоновского поля является случайной величиной r > 0, которая в объеме определяется следующими функциями распределения $F_1(r)$ и плотности $f_1(r)$ вероятностей [20]:

$$F_{1}(r) = 1 - e^{-\frac{4}{3}\pi r^{3}\lambda}, \qquad (2.10)$$

$$f_{1}(r) = 4\pi\lambda r^{2}e^{-\frac{4}{3}\pi r^{3}\lambda}, \qquad (2.11)$$

$$f_1(r) = 4\pi\lambda r^2 e^{-\frac{4}{3}\pi r^3\lambda},$$
 (2.11)

где r — расстояние между антеннами объектов беспроводных сенсорных сетях в метрах.

Тогда среднее расстояние от произвольно выбранного сенсорного устройства до ближайшего к нему сенсорного устройства вычисляется по формуле:

$$\overline{r_1} = \frac{1}{9} \cdot \frac{\sqrt[3]{\pi^2} \sqrt[3]{2} \sqrt[6]{3^5}}{\lambda^{\frac{1}{3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)},$$
(2.12)

где $\Gamma()$ – гамма-функция.

Для функции распределения $F_n(r)$ и плотности $f_n(r)$ вероятностей расстояния до n-й по удаленности точки пуассоновского поля на плоскости справедливы формулы:

$$F_n(r) = \frac{\Gamma\left(n, \frac{4}{3}\pi r^3 \lambda\right) - \Gamma(n)}{\Gamma(n)},$$
(2.13)

$$f_n(r) = \frac{3^{1-n} e^{-\frac{4}{3}\pi r^3 \lambda} r^{3n-1} 4^n \pi^n \lambda^n}{\Gamma(n)}.$$
 (2.14)

Среднее расстояние до n-й умной вещи вычисляется по формуле:

$$\overline{r}_{n} = \frac{\sqrt[3]{3}\sqrt[3]{2}\Gamma\left(\frac{1}{3} + n\right)}{2\sqrt[3]{\pi}\sqrt[3]{3}\sqrt[3]{\lambda}\Gamma(n)}.$$
(2.15)

Требования к вероятностно-временным характеристикам беспроводных сетей также существенно отличаются от требований к проводным сетям. Одно из самых главных отличий заключается в требованиях к времени доставки данных беспроводными сенсорными сетями, которые могут варьироваться в широких пределах. Если в проводных сетях стандарта NGN установлена единая максимально допустимая задержка 100 мс для передачи данных между любыми элементами сетей, то требования к задержкам в интернете вещей

полностью зависят от вида физических процессов, протекающих в предметной области беспроводной сети, и фиксируемых датчиками сенсорных устройств.

Например, в сельскохозяйственных приложениях опрос датчиков, измеряющих температуру почвы, может производиться один раз в несколько дней, а допустимое время их реакции на сигнал опроса может измеряться секундами. Совсем другие требования к задержкам предъявляются в сетях, измеряющих показатели здоровья животных. Только уменьшение задержки до 10 мс позволяет ветеринарным приложениям изменить традиционную модель лечения животных. При этом устройства, носимые животными, могут как контролировать ход лечения, оценивать влияние медикаментов, фиксировать изменение физических показателей, ход реабилитации, так и воздействовать на состояние животного при помощи специальных актуаторов.

Для сетей NGN, в которых обеспечение своевременной доставки пакета данных от источника к получателю является главной задачей проектирования, разработано большое количество моделей оценки вероятностно-временных характеристик и оптимизации по соответствующим критериям [51]. Большинство из этих моделей могут использоваться и для беспроводных сенсорных сетей.

Принципиальное отличие сенсорных устройств OT терминалов проводных сетей связано с автономным электропитанием. По этой причине время жизни сенсорных сетей зависит от продолжительности работы источников энергии каждого устройства, а энергосбережение является важным приоритетом разработчиков беспроводных сетей [93]. Для экономии заряда батареи следует использовать аппаратно-программные и системные методы. Первые связаны cтехнологиями производства устройств. Необходимо ориентироваться на современной техпроцесс и надежность [92] при выборе чипов и других компонент, стремиться к уменьшению напряжения питания, применять эффективные схемные решения, использовать системное обеспечение, особенностям программное соответствующее сенсорных

устройств, разрабатывать эффективные алгоритмы предварительной обработки данных, стремиться к увеличению периода сна устройств и т.д.

Анализ типичного профиля энергопотребления сенсорных устройств, учитывающий фазы сбора, обработки, приема и передачи данных и сон, показывает следующее [33]:

- главным потребителем энергии является приемопередатчик;
- энергопотребление на этапах обработки данных значительно меньше, чем при их передаче по радиоканалу;
- надо стремиться к предварительной обработке, сжатию данных для сокращения объема пересылаемых бит;
 - основную часть жизни вещь должна спать.

Энергия, потребляемая сенсорными устройствами, существенно зависит от пространственных и временных характеристик сенсорной сети.

Пространственные свойства влияют на энергопотребление сенсорных устройств, так как увеличение расстояния между взаимодействующими устройствами требует увеличения мощности сигнала на передающей антенне по формуле Фрииса (2.1) [43, 45]. Формула Фрииса позволяет получить оценки для допустимого расстояния между взаимодействующими устройствами (2.2).

Воспользоваться этой формулой можно, если известны:

- наименьший допустимый уровень сигнала на приемной антенне,
 зависящий от чувствительности радиоприемника и уровня помех;
- уровень сигнала на передающей антенне, определяющий энергопотребление сенсорных устройств;
- условия распространения радиосигналов в пространстве сельскохозяйственных угодий, как правило характеризующиеся отсутствием плотной застройки.

Таким образом, мощность, затрачиваемая на передачу сигналов, непосредственно зависит и от размера сенсорного поля, и от плотности размещаемых в нем устройств.

Временные характеристики влияют на энергопотребление через интенсивность возникновения и продолжительность t периодов активности устройств, в течении которых в эфир излучаются те или иные радиосигналы.

Энергию e, затрачиваемую на передачу одного блока данных сенсорным устройством, можно оценить по формуле:

$$e = E_{\text{nep}} \cdot t \,, \tag{2.16}$$

в которой пространственные характеристики определяют значение мощности $E_{\text{пер}}$, а временные — длительность t.

Предположим, что сенсорные устройства расположены случайным образом в объеме сельскохозяйственных угодий, имеющих форму шара, и образуют сенсорное поле точек (рис. 2.1). В сельскохозяйственных приложениях их расположение можно описать пуассоновским законом, которое обладает такими свойствами [20]:

- вероятность появления любого количества точек в любой области пространства вне зависимости от количества выпавших точек в других областях, не пересекающих эту область;
- вероятность попадания хотя бы двух точек в основной диапазон пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания в основной диапазон одной точки.

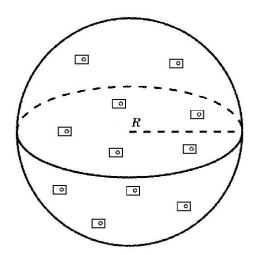


Рисунок 2.1 – Размещение умных вещей в пространстве шара

Используем в этой работе обозначения и терминологию [7]:

r – расстояние между антеннами объектов беспроводных сенсорных сетях (БСС) в метрах;

k — количество транзитов (хопов), которые возникают при использовании одних сенсорных устройств для транзита блока данных переданных другими сенсорными устройствами;

 γ – интенсивность передачи блоков данных одним устройством;

 v_c – скорость света;

 λ – плотность распределения сенсорных устройств в объёме;

f – частотный диапазон передачи;

b – длина передаваемых блоков (бит);

 Γ () – гамма-функция;

R — радиус шара.

Расстояние между ближайшими точками пуассоновского поля является случайной величиной r > 0, которая в объёме определяется следующими функциями распределения и плотности вероятностей, соответственно [20]:

$$F_{1}(r) = 1 - e^{-\frac{4}{3}\pi r^{3}\lambda}, \qquad (2.17)$$

$$f_{1}(r) = 4\pi\lambda r^{2}e^{-\frac{4}{3}\pi r^{3}\lambda}, \qquad (2.18)$$

$$f_1(r) = 4\pi\lambda r^2 e^{-\frac{4}{3}\pi r^3\lambda},$$
 (2.18)

Затем вычисляется среднее расстояние между произвольно выбранным сенсорным устройством и ближайшим сенсорным устройством по формуле:

$$\overline{r} = \frac{1}{9} \cdot \frac{\sqrt[3]{\pi^2} \sqrt[3]{2} \sqrt[6]{3^5}}{\lambda^{\frac{1}{3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}.$$
 (2.19)

Требуемый сигнала на передающей уровень антенне, если предположить, что уровень радиосигнала на приемной антенне постоянен, случайной величиной является И зависит otрасстояния между взаимодействующими устройствами.

Поэтому средняя мощность на передатчике по формуле Фрииса принимает вид [8]:

$$E_{\text{nep}} = \frac{16E_{\text{np}}\pi^2 r^2 f^2}{C_{\text{np}}C_{\text{nep}}v_c^2},$$
 (2.20)

$$\bar{E}_{\text{nep}} = \frac{16}{27} \frac{E_{\text{np}} \sqrt[3]{\pi^{10}} \sqrt[3]{4} \sqrt[2]{9} f}{\sqrt[3]{\lambda^2} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)^2 C_{\text{np}} C_{\text{nep}} v_c},$$
(2.21)

где $\overline{E}_{\text{пер}}$ — средняя мощность радиосигнала на передающей антенне [Вт], $E_{\text{пр}}$ — постоянная мощность радиосигнала на принимаемой антенне [Вт], $C_{\text{пер}}$ — коэффициент усиления передающей антенны, $C_{\text{пр}}$ — коэффициент усиления приёмной антенны, v_c — скорость света, f — частотный диапазон передачи.

Общее время передачи блока данных от сенсорного устройства до базовой станции зависит от количества хопов и определяется выражением [8]:

$$\overline{t} = (k+1) \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2 \cdot f}. \tag{2.22}$$

Количество хопов будем считать в сторону увеличения к ближайшему целому числу:

$$k = \left[\frac{R}{2\overline{r}}\right] = \left[\frac{R}{2 \cdot \frac{1}{9} \cdot \frac{\sqrt[3]{\pi^2} \sqrt[3]{2}\sqrt[3]{3^5}}{\sqrt[3]{\lambda}\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}}\right] = \frac{9\sqrt[3]{\lambda}\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)R}{\sqrt[3]{\pi^2} \sqrt[3]{2}\sqrt[3]{3^5}}.$$
 (2.23)

Тогда общее время принимает вид:

$$\overline{t} = \frac{1}{2} \frac{\left[\frac{3}{4} \cdot \frac{R\sqrt[3]{4}\sqrt[6]{3}\sqrt[3]{\lambda}\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}{\sqrt[3]{\pi^2}} \right] + 1 \gamma b}{f}.$$
 (2.24)

Средняя энергия, затрачиваемая на передачу блока сенсорного устройства:

$$\overline{e} = \overline{E}_{\text{nep}} \cdot \overline{t} . \tag{2.25}$$

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

$$\overline{e} = \frac{8}{27} \frac{10^{3} \sqrt{4^{3}} \sqrt[3]{4^{3}} \sqrt[3]{4^{3}} \sqrt[3]{4^{2}} \sqrt[3]{$$

В данном разделе были предложены метод и модель для комплексной оценки пространственных, временных и энергетических характеристик. Данный метод позволяет увидеть, как одни данные зависят от других. Исследование позволило определить показатели для оценки характеристик энергопотребления сенсорных устройств в трехмерном пространстве и разработать модель для оценки этих показателей.

2.4. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей

В представлен протокол множественного разделе коммуникационным ресурсам на участке последней мили – сенсорной сети Интернета вещей. Разработана модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей. Модель, позволяет оценить вероятностновременные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов. Модель позволяет проводить расчеты вероятностно-временных характеристик, количественно описывающих процесс передачи беспроводной среде сообщений, генерируемых различными типами smarts things IoT: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков

информационной Программа данных, скорости реального времени. влияние рассчитывает И анализирует параметров регулируемого множественного доступа на вероятностно-временные характеристики процесса передачи в шеринговой сети множественного доступа.

Предложена математическая модель, позволяющая оценивать качество передачи в рассматриваемой сети интернета вещей.

При разработке математической модели предполагаем следующее:

I — количество типов умных вещей, (i = 1,2,...,I). Умная вещь с меньшим номером нуждаются в меньшей скорости передачи данных, а наименьшая скорость требуется умная вещь 1-го типа — и соответственно дли них значение среднего допустимого времени старения данных T_i [c] — максимально.

N — общее число окон в одном канале передачи:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_t. (2.27)$$

Вещи одного типа используют выделенные им ресурсы на первой и второй фазе. Формируемые ими блоки данных образуют пуассоновский поток.

Скорость передачи данных по радиоканалу на второй фазе обозначается через V [бит/с]. Предполагаем, что скорости всех радиоканалов одинаковы.

Все время передачи одного канала разделяется на циклы, которые поделены на временные окна.

Длительность окна для передачи одного блока данных $T_{o\kappa}[c]$ вычисляется по формуле:

$$T_{\text{ok}} = \frac{k}{V}.\tag{2.28}$$

Длительность окна достаточна для передачи блока данных и одинакова для умных вещей всех типов.

Средний интервал однократной передачи блока данных для умных вещей i-го типа τ_i (время передачи одного блока данных, поступившего от вещей i-го типа):

$$\tau_i = T_{o\kappa} \cdot \frac{N}{N_i}, \ i = 1, 2, ... I.$$
 (2.29)

Количество временных окон на второй фазе Y_i , которые доступны умные вещи i-го типа:

$$Y_i = N_i \cdot Z, \ i = 1, 2, ... I.$$
 (2.30)

Предполагается, что все радиочастотные каналы идентичные по своей логической структуре.

Интенсивность потока поступающих блоков данных Λ [блок/с]. Λ_i — интенсивность поступления блоков данных от умных вещей i-го типа (i=1,2,...I). Обозначим как q_i — доля блоков данных i-го типа в общем потоке блоков данных Λ .

$$\Lambda_i = \Lambda \cdot q_i. \tag{2.31}$$

Интенсивность нагрузки A_i , которую создают умные вещи i-го типа вычисляется по формуле:

$$A_i = \Lambda_i \cdot q_i. \tag{2.32}$$

І-я фаза

Вероятность блокировки блока данных P_i от умных вещей i-го типа на первой фазе из-за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе. Вероятность P_i можно рассчитать по первой формуле Эрланга:

$$P_{i} = \frac{A_{i}^{Y_{i}}}{Y_{i}!} \left[\sum_{n=0}^{Y_{i}} \frac{A_{i}^{n}}{n!} \right]^{-1}, i = 1, 2, ... I$$
 (2.33)

II-я фаза

Интенсивность поступления блоков данных λ_i *i*-го типа умных вещей на один произвольный радиоканал второй фазы. Предполагается, что блоки данных, поступающие на вторую фазу, равномерно распределяются между всеми радиочастотными каналами и поэтому интенсивность их поступления в систему множественного доступа одного радиоканала определяется следующим образом:

$$\lambda_i = \frac{\Lambda_i \left(1 - P_i \right)}{Z}.\tag{2.34}$$

Преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) времени передачи блока данных i-го типа умных вещей $B_i(s)$ (i=1,2,...I):

$$B_{i}(s) = e^{-s\frac{N}{N_{i}}T_{\text{ok}}}. (2.35)$$

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

$$W_i(s) = \frac{s(1-\rho_i)}{s-\lambda_i + \lambda_i B_i(s)}.$$
(2.36)

загрузка среды передачи блоками данных *i*-го типа ρ_i (i=1,2,...I):

$$\rho_i = \lambda_i \cdot T_{o\kappa} \frac{N}{N_i}. \tag{2.37}$$

Условие эргодичности для второй фазы:

$$0 < \rho_i < 1, i = 1, 2, ... I$$

Вероятностно-временные характеристики процесса обслуживания заявок.

Среднее время задержки передачи блоков данных, поступающих от умных вещей i-го типа:

$$\overline{t_i} = -\frac{d\left[W_i(s)B_i(s)\right]}{ds}\bigg|_{S} = 0.$$
(2.38)

Из выражения (2.38), с учетом (2.36) и (2.37) получаем окончательное выражение для расчета $\overline{t_i}$:

$$\overline{t_i} = \frac{\frac{N}{N_i} T_{\text{ok}}(\rho_i - 2)}{2(\rho_i - 1)}.$$

Вероятность своевременной доставки блоков данных, поступающих от умных вещей i-го типа:

$$Q_i = -\frac{d\left[W_i(s)B_i(s)\right]}{ds}\bigg|_{S} = \frac{1}{T_i}.$$
(2.39)

Из выражения (2.39), с учетом (2.36) и (2.37) получаем окончательное выражение для расчета Q_i :

$$Q_{i} = \frac{\frac{1}{T_{i}}(1-\rho_{i})}{\frac{1}{T_{i}}-\lambda_{i}+\lambda_{i}e^{-\frac{1N}{T_{i}N_{i}}T_{\text{ok}}}}e^{-\frac{1N}{T_{i}N_{i}}T_{\text{ok}}},$$

где T_i — среднее допустимое время задержки передачи блока данных от умных вещей i-го типа i=1,2,...I .

Информационная скорость сети реального времени для каждого типа умных вещей показывает объем реально переданной вовремя информации соответствующего типа (в бит) за единицу времени (с). Потери в моделируемой системе могут возникать на:

 $1\,$ фазе. Потери характеризуются P_i — вероятностью блокировки блока данных от умных вещей i-го типа на первой фазе из-за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе;

 $2\,$ фазе. Потери характеризуются Q_i — вероятностью своевременной доставки блоков данных, поступающих от умных вещей i-го типа.

Соответственно выражение для расчета информационной скорости реального времени для умных вещей i-го типа будет иметь вид:

$$R_{PRi} = \Lambda_i \cdot k \cdot P_i \cdot Q_i \tag{2.40}$$

Получена модель массового обслуживания, описывающая процесс передачи данных от умных вещей различных типов в виде двухфазной СМО, позволяющая оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов: среднее времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, и информационной скорости реального времени.

2.5. Выводы по главе

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

- 1. 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.

ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

3.1. Имитационное моделирование

Одним из наиболее важных и эффективных средств, которыми располагает сегодня системный анализ, является имитационное моделирование [16]. Этот метод исследования систем, имеющий много общих черт с натурным моделированием, широко используется при реализации основных, организационных и вспомогательных процессов жизненного цикла сложной системы

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, описывающей реальную систему с достаточно высокой точностью, при котором проводятся эксперименты для получения информации о данной системе [16, 41].

Моделирование — это важный метод анализа, который очень прост в тестировании, легко проверяется, передается и понимается. По всем отраслям и дисциплинам, моделирование включает информацию о комплексах систем [42].

Моделирование позволяет испытать реальное цифровое представление системы. В отличие от физического моделирования, т.е. в построение масштабной копии здания, имитационное моделирование компьютеризировано и использует алгоритмы и уравнения. Программное обеспечение для моделирования обеспечивает динамическую среду для анализа компьютерных моделей по мере их запуска, включая возможность просмотра их в 2D или 3D [42].

Использование моделирования в бизнесе разнообразно, и оно часто используется, когда проведение экспериментов на реальной системе невозможно или непрактично, часто из-за затрат или времени [42].



Рисунок 3.1 – Общий алгоритм моделирования

Возможность анализа модели во время ее выполнения отличает имитационное моделирование от других методов, таких как использование Excel или линейного программирования. Имея возможность проверять процессы и взаимодействовать с имитационной моделью в действии, понимание и доверие быстро строятся [42].

Экспериментирование с данной моделью называют имитацией.

Имитационная модель — это логическое и математическое описание объекта, которое можно использовать в компьютерных экспериментах для проектирования, анализа и оценки поведения объекта [16].

Назначение имитационной модели состоит в том, чтобы воспроизвести поведение изучаемой системы по результатам анализа наиболее важных

связей между ее элементами или разработать имитационный набор изучаемой области для проведения различных экспериментов.

Области применения имитационного моделирования: бизнес-процессы, ИТ-инфраструктура, математическое моделирование исторических процессов, логистика, управление проектами, информационная безопасность, экономика.

GPSS (General Purpose Simulation System – система моделирования общего назначения) – это исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, описывающей реальную систему с достаточной точностью, чтобы можно было проводить эксперименты для получения информации о системе [40].

AnyLogic — единая платформа для имитационного моделирования любых бизнес-систем [17]. Три метода можно использовать в любой комбинации на одной программной основе для моделирования корпоративной системы любой сложности. В AnyLogic есть разные языки визуального моделирования: диаграммы процессов, диаграммы состояний, блок-схемы и диаграммы потоков и хранения.

Руthon — мультипарадигмальный язык программирования, поддерживающий императивное, процедурное, структурное, объектно-ориентированное программирование [75]. Python — это динамически интерпретируемый язык (собранный с помощью байт-кода). В исходном коде нет объявлений типов для переменных, параметров, функций или методов. Это делает код коротким и гибким, а проверка типов исходного кода во время работы теряется. Руthon отслеживает типы всех значений во время выполнения и помечает код, который не имеет смысла во время выполнения.

Руthon позволяет разрабатывать методы, которые можно использовать для создания моделей, в основе которых фигурируют вероятностные распределения и элементы массового обслуживания [75].

Для этого существует целый ряд библиотек, таких как: random, NumPy, Pylab, AnyLogic Cloud, SimPy.

Библиотека дискретно-событийного моделирования SimPy — это Python фреймворк процессо-ориентированной дискретно-событийной системы моделирования. Его диспетчеры событий основаны на функциях-генераторах Python.

Процессы в SimPy – это генераторы Python, используемые для моделирования активных компонентов, таких как клиенты, транспортные средства или агенты.

Моделирование может выполняться в режиме «as fast as possible», в режиме реального времени (wall clock time) или в режиме ручного выполнения событий.

Теоретически, в SimPy можно сделать непрерывную симуляцию, но фактически это не осуществимо.

SimPy распространяется с руководством, подробной документацией и большим количеством примеров.

Достоинства: большой спектр библиотек для визуализации данных, обработки информации, легкий и понятный синтаксис.

Недостатки: необходимость наличия серьезных навыков и умений работы программиста, для разработки высококачественных моделей требуется большое количество времени.

Среда разработки, используемая в работе – PyCharm Community Edition.

Библиотеки: Tkinter – графический интерфейс, Math – обработка математических операций, matplotlib – визуализация графиков.

3.2. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей

Пошаговая реализация концепции интернета вещей во многие сферы деятельности человека (в производство, сельское хозяйство, транспортную инфраструктуру, жилищно-коммунальное хозяйство, экологические проекты и пр. [88]) сопровождается ростом популярности беспроводных сенсорных сетей (БСС), которые наряду с другими технологиями: идентификации, сенсорики, признаны ключевыми драйверами развития интернета вещей. БСС выполняют роль инфраструктурной основы, обеспечивающей информационное взаимодействия в интернете вещей.

На базе БСС реализуется взаимодействие умных вещей интернета вещей [4, 44]. Как правило, умные вещи используют независимые автономные источники питания и владеют ограниченным энергоресурсом [58]. Время жизни (или время работоспособности) БСС определяется периодом жизни каждой вещи, входящей в её состав. В следствие этого, при исследовании процессов функционирования БСС, необходимой задачей считается оценка энергетических показателей информационного взаимодействия умных вещей.

В качестве характеристик взаимодействия умных вещей с автономным питанием в БСС, предлагаются: вероятностно-временные характеристики (ВВХ) процесса передачи сообщений и вероятностно-энергетические характеристики. Случайный процесс передачи сообщений описывается средним временем и вероятностью своевременной доставки сообщения, а процесс энергопотребления умной вещью — мощностью радиосигнала, формируемого на передающей антенне. Допустимый уровень мощности радиосигнала зависит от уровня (мощности) помех в радиоканале.

Можно предположить, что наращивание мощности радиосигнала на выходе передающей антенны умной вещи, с одной стороны, повысит надежность передачи сигнала и позволит достичь улучшения качества

обслуживания, но, с иной стороны, приводит к увеличению трат энергии умными вещами, и, в соответствии с этим, к сокращению срока их жизни. Для продуктивной работы умных вещей и БСС в целом, а также для увеличения времени жизни сети принципиально отыскать баланс между качеством информационного взаимодействия и расходом энергии, т. е. выбрать такую мощность радиосигнала, которая обеспечит требуемую скорость и качество доставки сообщения.

Исследование взаимовлияния вероятностно-временных и вероятностноэнергетических характеристик БСС — это актуальная задача проектирования сетей интернета вещей и была затронута ранее в [24], где была предложена аналитическая модель оценки энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях.

В данной работе рассматривается имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей, разработанная на основе аналитической [24].

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

Имитационная модель позволяет описать объекты информационного взаимодействия интернета вещей, и может быть использована для экспериментирования в целях проектирования, анализа и оценки функционирования БСС интернета вещей [40]. В отличие от аналитического решения, в результате которого были получены формулы и рассчитаны вероятностно-временные и вероятностно-энергетические характеристики [40], имитационная модель позволит определить, какие параметры и как влияют на моделируемую систему, как эти параметры связаны друг с другом.

Целью применения имитационного моделирования в данном случае является проверка проведенных ранее на базе аналитической модели численных экспериментов по расчету BBX [24], а также проведение дополнительных экспериментов.

При моделировании информационного взаимодействия умных вещей в БСС:

— учитываются физические параметры взаимодействия узлов беспроводной сети: число умных вещей — N, расстояние между ними — D [м], B — частота радиоканала [Гц], мощность радиосигнала на передающей и на приемной антенне — $P_{\text{пер}}$ и $P_{\text{пр}}$ [Вт], мощность шума в радиоканале — $P_{\text{шум}}$ [Вт] и пр. Определяются: формат и длина передаваемых сообщений, и режимы их передачи [9]. Формула для расчета длительности временного окна имеет следующий вид:

$$T_{\text{oK}} = \frac{n_{\text{K}} + n_{\text{KB}}}{B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}} \right)} + t_{\text{pij}} + t_{\text{ДKK}} + t_{\text{pji}} + t_{\text{ДKKB}},$$
(3.1)

где $n_{\kappa g}$ — длина квитанции [бит], $t_{\mathrm{p}ij}$ и $t_{\mathrm{p}ji}$ — времена распространения сигнала от i-ой станции к j-ой и в обратном направлении соответственно [c], $t_{\mathrm{дкк}}$ и $t_{\mathrm{дкк}}$ — времена декодирования кадра и квитанции [c].

Для оценки качества информационного взаимодействия — случайного процесса передачи сообщений в БСС интернета вещей используем заданную математическую модель [8]. Исходя из неё напишем итоговые формулы для расчета ВВХ процесса передачи сообщений в БСС:

4) среднего времени доставки сообщения [с]:

$$\overline{t} = \frac{N \cdot T_{\text{OK}} (\lambda \cdot N \cdot T_{\text{OK}} - 2)}{2(\lambda \cdot N \cdot T_{\text{OK}} - 1)}.$$
(3.2)

5) вероятность своевременной доставки сообщения:

$$Q = \frac{\frac{1}{\overline{T_{\text{ДОП}}}} (1 - \lambda \cdot N \cdot T_{\text{OK}})}{-\frac{1}{\overline{T_{\text{ДОП}}}} \cdot N \cdot T_{\text{OK}}} e^{-\frac{1}{\overline{T_{\text{ДОП}}}}} \cdot N \cdot T_{\text{OK}}},$$

$$\frac{1}{\overline{T_{\text{ДОП}}}} \cdot \lambda + \lambda \cdot e^{-\frac{1}{\overline{T_{\text{ДОП}}}}} \cdot N \cdot T_{\text{OK}}$$
(3.3)

где $\overline{T_{\text{доп}}}$ – среднее допустимое время старения сообщений [c], N – число умных вещей, T_{OK} – временной интервал, зарезервированный за каждой станцией, λ – интенсивность поступления сообщения на передачу.



Рисунок 3.2 – Физическая схема передачи сообщений

Имитационная модель БСС была реализована в среде AnyLogic и при её разработке были учтены особенности множественного доступа с синхронновременным доступом к эфирной среде передачи, используемого для передачи сообщений умными вещами. Имитационная модель представлена на рисунке 2 и включает в себя несколько связанных модулей: Заявки — поток заявок, поступающих в системе, Очередь — очередь заявок, ожидающих прием заявок в системе, Канал — 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).

В модели очереди прибытия являются марковскими, имеют общее распределение и для них существует всего 1 обслуживающий прибор. В качестве результата работы программа предоставляет вероятностновременные характеристики для анализа по модели M/D/1, такие как: количество заявок в очереди, среднее время нахождения заявки в очереди, количество заявок, покинувших систему и среднее время заявок в системе в целом.

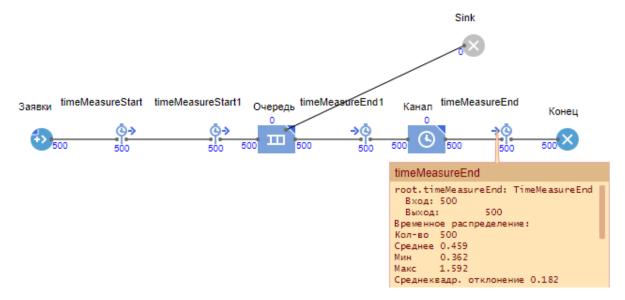


Рисунок 3.3 – Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей

Имитационная модель многоканальной эфирной среда передачи данных

Дальнейшее развитие исследований на базе разработанной имитационной модели проводилось в следующих направлениях: рассмотрена многоканальная эфирная среда передачи – M/D/N (рис. 3.6, 3.7).

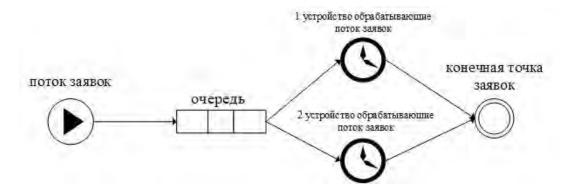


Рисунок 3.4 — Физическая схема передачи сообщений с 2-мя обрабатывающимися устройствами

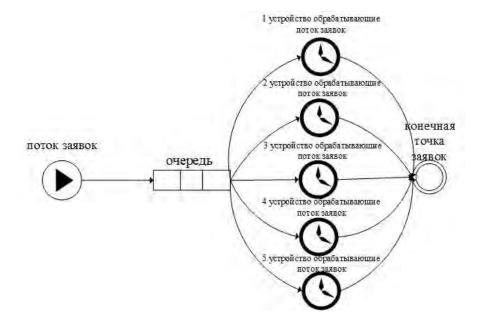


Рисунок 3.5 — Физическая схема передачи сообщений с 5-ю обрабатывающимися устройствами

Результаты проведенных исследований представлены ниже:

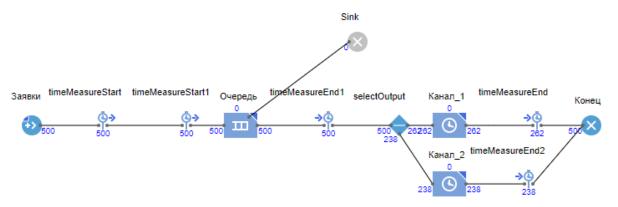


Рисунок 3.6 – Имитационная модель. Многоканальная эфирная среда передачи данных (M/D/2)

Моделирование для случая многоканальной эфирной среды передачи (M/D/N) осуществлялось при следующих исходных данных $\lambda = 1[\cos(c)]$, $N \cdot T_{ok} = 0.362$ [c], N = 15000, $T_{ok} = 0.000024$ [c].

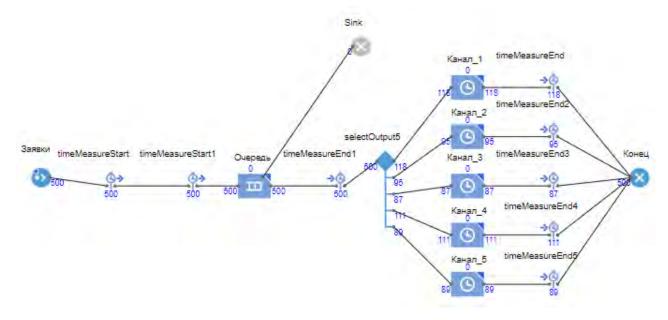


Рисунок 3.7 – Имитационная модель. Многоканальная эфирная среда передачи данных (M/D/5)

Имитационное моделирование системы доступа с приоритетным обслуживанием

В работе рассматривается имитационное моделирование системы доступа к ресурсам беспроводной сенсорной сети (каналу передачи) с использованием относительных приоритетов. Методы имитационного моделирования позволяют проводить исследование влияния введения процедуры приоритетного доступа на эффективность функционирования сенсорной сети.

Объект исследования.

Одноканальная беспроводная сенсорная сеть, поддерживающая передачу сообщений от сенсорных узлов k-типов, где k — число приоритетов: k = 1, 2, 3... (k = 1 соответствует обслуживанию без приоритетов). Все узлы в сети соответственно разделены на k групп. Для узлов каждой группы установлено свое допустимое время передачи сообщения в сети — $t_{iдоп}$ (c) (i = 1...k). Если сообщение не передано за время $t_{iдоп}$, то оно отбрасывается. Предположим, при моделировании, что передаются сообщения одинаковой

фиксированной длины (n) и поток сообщений, поступающий от группы узлов i-го приоритета простейший с интенсивностью λ_i . (i=1...k) Приоритетное обслуживание в беспроводной сети осуществляется следующим образом: все узлы опрашиваются и сначала передаются сообщения с самым высоким k-ым приоритетом, если таких нет, то передаются сообщения с k-l-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 $R_{\rm PB}$ (бит/с). Информационная скорость реального времени показывает, какой объем передаваемой информации (бит) реально вовремя передается за единицу времени (c) по сенсорной сети. Для определения $R_{\rm PB}$ можно воспользоваться соотношением $R_{\rm PB} = R_{\rm 1PB} + R_{\rm 2PB} + \ldots + R_{\it iPB} + \ldots + R_{\it kPB}$, ($\it i=1\ldots k$) где $R_{\it iPB}$ — информационная скорость реального времени группы узлов $\it i$ -го приоритета определяется следующим образом: $R_{\it iPB} = n \lambda_{\it i} P_{\it i}$, ($\it i=1\ldots k$), где $P_{\it i}$ — вероятность своевременной доставки сообщений узлов $\it i$ -го приоритета определяется имитационно, $\it n$ — длина передаваемого блока.

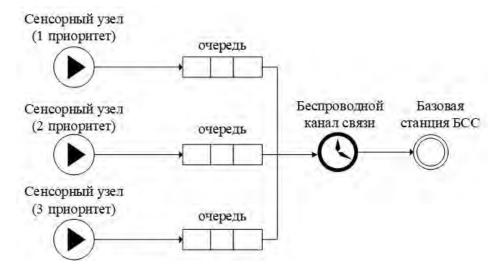


Рисунок 3.8 – Физическая схема передачи сообщений с приоритетами

В созданной имитационной модели используется 3 приоритета.

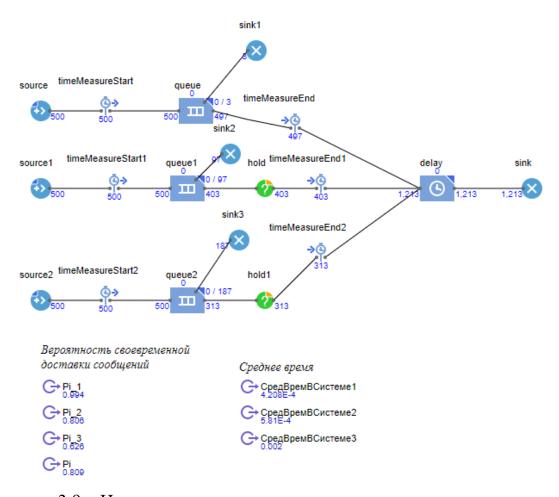


Рисунок 3.9 – Имитационная модель системы доступа с приоритетным обслуживанием

В данной модели source — сенсорный узел с высоким приоритетом, source1 — сенсорный узел со средним приоритетом, source2 — сенсорный узел с низким приоритетом. Блоки queue, queue1, queue2 — очередь, ожидающих приема сообщения следующим блоком. Блоки sink1, sink2 sink3 отвечают за учет не доставленных сообщений. Блоки hold, hold1 — отвечают за блокировку отправки сообщения с более низким приоритетом. delay — задерживает сообщение на заданный период времени. Конечный блок sink — отвечает за учет правильно доставленных сообщений. Р_і — Вероятность с своевременной доставки сообщений.

3.3. Выводы по главе

Разработан имитационных моделей комплекс информационного взаимодействия в интернете вещей. Имитационные модели позволяют описать объекты информационного взаимодействия интернета вещей и могут применяться для проведения разнообразных экспериментов 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, неоднородными сенсорными узлами использованием относительных приоритетов в обслуживании.

Имитационная модель БСС была реализована в среде AnyLogic и при её разработке были учтены особенности множественного доступа с синхронновременным доступом к эфирной среде передачи, используемого для передачи сообщений умными вещами.

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, имитационная модель позволит чётко определить, какие параметры влияют на моделируемую систему и как эти параметры связаны друг с другом.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

4.1. Программы ЭВМ для оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей

4.1.1. Программа расчета характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями на первой фазе (MASWOLFP)

MASWOLFP ЭТО программа, предназначена ДЛЯ расчета вероятностных и временных характеристик передачи различных типов данных с использованием смарт-объектов IoT: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, а информационной Программа также скорости реального времени. параметров рассчитывает анализирует влияние регулируемого вероятностно-временные множественного доступа характеристики на процесса передачи в шеринговой сети множественного доступа. MASWOLFP является расширением интегрированного математического пакета Maple [5].

Целью настоящей программы является расчета вероятностновременных характеристик процесса передачи различных типов данных: среднее времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, и информационной скорости реального времени.

Чтобы подключить разработанную программу, необходимо сначала запустить оболочку Maple и затем предлагаемую программу.

Требования к аппаратным средствам:

IBM РС-совместимые ПК. Процессор-Pentium 100МГц. Оперативная память 32 Мб. Жесткий диск 800 Мб.

Требования к программным средствам:

Операционная система — Windows XP и последующие версии. Интегрированный математический пакет Maple, версии от 6 до 18. restart;

Количество каналов для предачи данных на второй фазе

>Z;

 \boldsymbol{Z}

Количество типов умных вещей

$$> I := 3;$$

$$I := 3$$

Количество временных окон, которые доступны умным вещам i-го типа (i = 1, 2, ..., I).

>N[1];

 N_1

>N[2];

 N_2

>N[3];

 N_3

Общее число в одном канале передачи

$$> N[o]:= N[1]+N[2]+N[3];$$

$$No := N_1 + N_2 + N_3$$

Количество временных окон на второй фазе, которые доступны умным вещам i-го типа (количество обслуживавших приборов для умных вещей i-го типа на первой фазе)

>for i from 1 by 1 to I do Y[i]:= N[i]*Z end do

$$Y_1 := N_1 Z$$

$$Y_2 := N_2 Z$$

$$Y_3 := N_3 Z$$

Интенсивность потока поступающих заявок

 $> \Lambda$

Λ

Доля заявок i-го типа в общем потоке заявок Λ

> q[1];

 q_1

> q[2];

 q_2

> q[3];

 q_3

Интенсивность нагрузки, которую создают умные вещи i-го типа

 $>\Lambda[1]:=\Lambda^*q[1];$

 $\Lambda_1 := \Lambda q_1$

 $>\Lambda[2]:=\Lambda*q[2];$

 $\Lambda_2 := \Lambda q_2$

 $>\Lambda[3]:=\Lambda*q[3];$

 $\Lambda_3 := \Lambda q_3$

Длина блоков данных (бит)

>k;

 \boldsymbol{k}

Скорость передачи данных по всем радиоканалам на второй фазе (бит/c) >V;

V

Длительность окна для передачи одного блока данных (сек)

>T[ok]:=evalf(k/V);

$$T_{ok} := \frac{k}{V}$$

т[i]-интервалы однократной передачи блока данных для умных вещей i-го типа (сек)

> for i from 1 by 1 to I do $\tau[i]$:= evalf(T[ok]*No/N[i]) end do

$$\tau_1 := \frac{k \, No}{V \, N_1}$$

$$\tau_2 := \frac{k \, No}{V \, N_2}$$

$$\tau_3 := \frac{k \, No}{V \, N_2}$$

Интенсивность нагрузки, поступающей на систему обслуживания первой фазы от вещей i-го типа (Эрл)

> for i from 1 by 1 to I do A[i]:= $\Lambda[i] * \tau[i]$ end do

$$A_1 := \frac{\Lambda \, q_1 \, k \, No}{V \, N_1}$$

$$A_2 := \frac{\Lambda \, q_2 \, k \, No}{V \, N_2}$$

$$A_3 := \frac{\Lambda \, q_3 \, k \, No}{V \, N_3}$$

> fa1:= plot([A[1]], $\Lambda = 0$.. 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = ['A[1]']);

> fa2:= plot([A[2]], $\Lambda = 0$.. 1000, color = [blue], legend = ['A[2]']);

>fa3:= plot([A[3]], $\Lambda = 0$.. 1000, legend = ['A[3]'], linestyle = [dot]);

>plots[display](fa1, fa2, fa3, labels = [' Λ ', ' Λ ']);

Вероятность блокировки передачи блока данных от умных вещей **i**-го типа на первой фазе из за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе (рассчитываем по первой формуле Эрланга).

> for i from 1 by 1 to I do

 $P[i] := ((A[i])^{(Y[i])}/(Y[i]!)*((\∑)((A[i])^{(n)}/(n!))^{(-1)}) end do$

$$P_{1} := \frac{\left(\frac{\Lambda q_{1} k No}{V N_{1}}\right)^{N_{1} Z}}{\Gamma(Z N_{1} + 1)}$$

$$(N_{1} Z)! e^{\frac{\Lambda q_{1} k No}{V N_{1}}} \Gamma\left(Z N_{1} + 1, \frac{\Lambda q_{1} k No}{V N_{1}}\right)$$

$$P_{2} := \frac{\left(\frac{\Lambda q_{2} k No}{V N_{2}}\right)^{N_{2} Z}}{\Gamma(Z N_{2} + 1)}$$

$$(N_{2} Z)! e^{\frac{\Lambda q_{2} k No}{V N_{2}}} \Gamma\left(Z N_{2} + 1, \frac{\Lambda q_{2} k No}{V N_{2}}\right)$$

$$P_{3} := \frac{\left(\frac{\Lambda q_{3} k No}{V N_{3}}\right)^{N_{3} Z}}{\Gamma(Z N_{3} + 1)}$$

$$(N_{3} Z)! e^{\frac{\Lambda q_{3} k No}{V N_{3}}} \Gamma\left(Z N_{3} + 1, \frac{\Lambda q_{3} k No}{V N_{3}}\right)$$

Контрольный расчет: при $A_i = 8,616$ и $Y_i = 10$, получаем табличное значение $P_i = 0,15$, вычисленное значение $P_i = 0,15$.

 $> p1 := plot([P[1]], \Lambda = 0 ... 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = ['P[1]']);$

$$>$$
 fp2:= plot([P[2]], $\Lambda = 0$.. 1000, color = [blue], legend = ['P[2]']);

$$> \text{fp3}:= \text{plot}([P[3]], \Lambda = 0 ... 1000, \text{legend} = ['P[3]'], \text{linestyle} = [\text{dot}]);$$

> plots[display](fp1, fp2, fp3, labels = [' Λ ', 'P']);

Интенсивность поступления блоков данных і-го типа на вторую фазу

> for i from 1 by 1 to I do $\lambda[i] := (\Lambda[i] * (1-P[i]))/Z$ end do

$$\begin{split} & \lambda_1 \coloneqq \frac{\Lambda \, q_1 \left(1 - P_1\right)}{Z} \\ & \lambda_2 \coloneqq \frac{\Lambda \, q_2 \left(1 - P_2\right)}{Z} \\ & \lambda_3 \coloneqq \frac{\Lambda \, q_3 \left(1 - P_3\right)}{Z} \end{split}$$

> fl1:= plot([λ [1]], Λ = 0 .. 1500, color = [red], linestyle = [dash], legend = [' λ [1]']);

$$>$$
 fl2:= plot([λ [2]], $\Lambda = 0$.. 1500, color = [blue], legend = [' λ [2]']);

$$>$$
 fl3:= plot([λ [3]], Λ = 0 .. 1500, legend = [' λ [3]'], linestyle = [dot]);

> plots[display](fl1, fl2, fl3, labels = [' Λ ', ' λ ']);

Загрузка радиоканалов (среды передачи) блоками данных і-го типа

> for i to from 1 by I do $\rho[i]:=\lambda[i]*T[ok]*No/N[i]$ end do

$$\rho_1 := \frac{\Lambda \, q_1 \, \left(1 - P_1\right) \, k \, No}{Z \, V \, N_1}$$

$$\rho_2 := \frac{\Lambda q_2 \left(1 - P_2\right) k No}{Z V N_2}$$

$$\rho_3 := \frac{\Lambda q_3 \left(1 - P_3\right) k No}{Z V N_3}$$

> f11:= plot([ρ [1]], Λ = 0 .. 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = [' ρ [1]']);

$$>$$
 f22:= plot([ρ [2]], Λ = 0 .. 469.5, color = [blue], legend = [' ρ [2]']);

> f33:= plot(
$$[\rho[3]]$$
, $\Lambda = 0$.. 346, legend = $[\rho[3]]$, linestyle = $[dot]$);

> plots[display](f11, f22, f33, labels = [' Λ ', ' ρ ']);

ПЛС времени передачи блока данных і-го типа умных вещей

> for i from 1 by I do B[i]:= exp(-s*No*T[ok]/N[i]) end do

$$B_1 := e^{-\frac{k No}{V N_1}}$$

$$B_2 := e^{-\frac{k No}{V N_2}}$$

$$B_3 := e^{-\frac{k No}{V N_3}}$$

ПЛС времени ожидания начала передачи блока данных от умных вещей і-го типа

> for i from 1 by I do W[i]:= (s*(1- ρ [i]))/(B[i]* λ [i]+s- λ [i]) end do

$$\begin{split} W_{1} &\coloneqq \frac{1}{-\frac{k\,No}{V\,N_{1}}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{2} + 1 - \frac{\Lambda\,q_{1}\,\left(1 - P_{1}\right)}{Z} \\ W_{2} &\coloneqq \frac{1}{-\frac{k\,No}{V\,N_{2}}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} + 1 - \frac{\Lambda\,q_{2}\,\left(1 - P_{2}\right)}{Z} \\ W_{3} &\coloneqq \frac{1}{-\frac{k\,No}{V\,N_{3}}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \\ \end{split}$$

Среднее время задержки передачи блока данных умной вещью і-го типа > for i from 1 by I do t[cr][i]:= ((No/(N[i])*T[ok]*(ρ [i]-2)/(2*(ρ [i]-1)) end do

$$t_{cr_{1}} \coloneqq \frac{No \, k \left(\frac{\Lambda \, q_{1} \, \left(1 - P_{1} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{1}} - 2 \right)}{V \, N_{1} \left(\frac{2 \, \Lambda \, q_{1} \, \left(1 - P_{1} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{1}} - 2 \right)}$$

$$t_{cr_{2}} \coloneqq \frac{No \, k \left(\frac{\Lambda \, q_{2} \, \left(1 - P_{2} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{2}} - 2 \right)}{V \, N_{2} \left(\frac{2 \, \Lambda \, q_{2} \, \left(1 - P_{2} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{2}} - 2 \right)}$$

$$t_{cr_{3}} \coloneqq \frac{No \, k \left(\frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{3}} - 2 \right)}{V \, N_{3} \left(\frac{2 \, \Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3} \right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{3}} - 2 \right)}$$

> f1:= plot([t[cr][1]], $\Lambda = 0$.. 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = ['t[cr][1]']);

$$> f2:= plot([t[cr][2]], \Lambda = 0 ... 469.5, color = [blue], legend = ['t[cr][2]']);$$

$$>$$
 f3:= plot([t[cr][3]], $\Lambda = 0$.. 346.2, legend = ['t[cr][3]'], linestyle = [dot]);

> plots[display](f1, f2, f3, labels = [' Λ ', 't(c)']);

Допустимое время старения

> Td[1];

 Td_1

> Td[2];

 Td_2

> Td[3];

 Td_3

Вероятность своевременной доставки передачи блока данных типа умной вещи

>for I from 1 by 1 to I do Q[i]:= $(((1/Td[i])*(1-\rho [i]))/((1/Td[i])-\lambda[i]+\lambda[i]*exp(-(1/Td[i])*(No/N[i])*T[ok]))*(exp(-1/Td[i])*(No/N[i])*T[ok]))end do$

$$Q_1 :=$$

$$\frac{\left(1 - \frac{\Lambda q_{1} \left(1 - P_{1}\right) k No}{Z V N_{1}}\right) e^{-\frac{No k}{V T d_{1} N_{1}}}}{Z V T d_{1} \left(\frac{1}{T d_{1}} - \frac{\Lambda q_{1} \left(1 - P_{1}\right)}{Z} + \frac{\Lambda q_{1} \left(1 - P_{1}\right) e^{-\frac{No k}{V T d_{1} N_{1}}}}{Z}\right)}{Z}$$

$$Q_2 :=$$

$$\left(1 - \frac{\Lambda q_{2} (1 - P_{2}) k No}{Z V N_{2}}\right) e^{-\frac{No k}{V T d_{2} N_{2}}}$$

$$T d_{2} \left(\frac{1}{T d_{2}} - \frac{\Lambda q_{2} (1 - P_{2})}{Z} + \frac{\Lambda q_{2} (1 - P_{2}) e}{Z}\right)$$

$$\begin{aligned} Q_{3} &:= \\ & \left(1 - \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{3}}\right) \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{3} \, N_{3}}} \\ & \left(\frac{1}{Td_{3}} - \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right)}{Z} + \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{3} \, N_{3}}}}{Z}\right) \end{aligned}$$

> fq1:= plot([Q[1]], $\Lambda = 0$.. 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = ['Q[1]']);

> q2:= plot([Q[2]], $\Lambda = 0$.. 469.5, color = [blue], legend = ['Q[2]']);

 $> fq3 := plot([Q[3]], \Lambda = 0 ... 346.2, legend = ['Q[3]'], linestyle = [dot]);$

> plots[display](fq1, fq2, fq3, g2, labels = [' Λ ', 'Q']);

Информационная скорость сети реального времени для каждого типа умных вещей

> for I from 1 by 1 to I do R[PB][i]:= Λ [i]*k*(1-P[i])*Q[i] end do

$$\begin{split} R_{PB_{1}} &:= \\ & \frac{ \Lambda \, q_{1} \, k \, \left(1 - P_{1}\right) \, \left(1 - \frac{\Lambda \, q_{1} \, \left(1 - P_{1}\right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{1}}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{1} \, N_{1}}} }{ Td_{1} \left(\frac{1}{Td_{1}} - \frac{\Lambda \, q_{1} \, \left(1 - P_{1}\right)}{Z} + \frac{\Lambda \, q_{1} \, \left(1 - P_{1}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{1} \, N_{1}}}}{Z}\right) \end{split}$$

$$\begin{split} R_{PB_{2}} &:= \\ & \frac{ \Lambda \, q_{2} \, k \, \left(1 - P_{2}\right) \, \left(1 - \frac{\Lambda \, q_{2} \, \left(1 - P_{2}\right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{2}}\right) \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{2} \, N_{2}}} }{ \left(\frac{1}{Td_{2}} - \frac{\Lambda \, q_{2} \, \left(1 - P_{2}\right)}{Z} + \frac{\Lambda \, q_{2} \, \left(1 - P_{2}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{2} \, N_{2}}}}{Z}\right)}{Z} \end{split}$$

$$\begin{split} R_{PB_{3}} &:= \\ &\frac{ \Lambda \, q_{3} \, k \, \left(1 - P_{3}\right) \, \left(1 - \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right) \, k \, No}{Z \, V \, N_{3}}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{3} \, N_{3}}} }{ \left(\frac{1}{Td_{3}} - \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right)}{Z} + \frac{\Lambda \, q_{3} \, \left(1 - P_{3}\right) \, \mathrm{e}^{-\frac{No \, k}{V \, Td_{3} \, N_{3}}}}{Z}\right)}{Z} \end{split}$$

> fr1:= plot([R[PB][1]], Λ = 0 .. 1000, color = [red], linestyle = [dash], legend = [R[PB]]);

$$> \text{fr2}:= \text{plot}([R[PB][2]], \Lambda = 0 ... 469.5, \text{color} = [\text{blue}], \text{legend} = [R[PB]]);$$

$$> \text{fr3} := \text{plot}([R[PB][3]], \Lambda = 0 ... 346.2, \text{legend} = [R[PB]], \text{linestyle} = [dot]);$$

> plots[display](fr1, fr2, fr3, labels = [' Λ ', 'R[PB]']);

Для построения графиков были использованы следующие исходные данные:

$$Z = 2$$
, $I = 3$, $N_1 = 1$, $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $k = 1024$, $V = 210000$, $q_1 = \frac{1}{15}$, $q_2 = \frac{1}{3}$, $q_1 = \frac{3}{5}$, $Td_1 = 0.1$, $Td_2 = 0.3$, $Td_3 = 0.6$.

4.1.2. Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ECMAN)

ЕСМАN — это программа, предназначенная для расчета зависимости вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах. Программа отражает взаимное влияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия умных вещей в эфирной среде, и позволяющие найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии. Программа ЕСМАN является расширением интегрированного математического пакета Maple [3].

Целью настоящей программы является расчет зависимости вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах.

Чтобы подключить разработанную программу, необходимо сначала запустить оболочку Maple и затем предлагаемую программу.

Программа позволяет: определить длительность временного окна, а также определить среднее время доставки сообщения, вероятность своевременной доставки сообщения, информационную скорость реального времени сети.

Требования к аппаратным средствам:

IBM РС-совместимые ПК. Процессор-Pentium 100МГц. Оперативная память 32 Мб. Жесткий диск 800 Мб.

Требования к программным средствам:

Операционная система — Windows XP и последующие версии. Интегрированный математический пакет Maple, версии от 6 до 18.

>restart:

Соотношения мощности радиосигнала на передающей антенне [Вт] и мощности шума в радиоканале [Вт].

>u:=P[per]/P[hym];

$$u := \frac{P_{per}}{P_{hym}}$$

Пропускная способность радиоканала, в соответствии с формулой Шеннона-Хартли

$$>C := F*log[2](1+u);$$

$$C := \frac{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)}{\ln(2)}$$

>t[kv] := n[kv]/C];

$$t_{kv} := \frac{n_{kv} \ln(2)}{F \ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)}$$

>t[k] := n[k]/C;

$$t_k := \frac{n_k \ln(2)}{F \ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hvm}}\right)}$$

>T[ok] := t[k]+t[pij]+t[dkk]+t[kv]+t[pij]+t[dkkv];

$$T_{ok} := \frac{\left(n_{kv} + n_{k}\right) \ln(2)}{F \ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)} + 2t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv}$$

Среднее время доставки сообщения [с]

>t[sr] := N*T[ok]*(N*lambda*T[ok]-2)/(2*(N*lambda*T[ok]-1))

$$\begin{split} t_{sr} &:= \left(N\left(\frac{\left(n_{kv} + n_k\right)\ln(2)}{F\ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)} + 2\,t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv}\right) \left(N\lambda\left(\frac{\left(n_{kv} + n_k\right)\ln(2)}{F\ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)} + 2\,t_{pij} + t_{dkk}\right) + t_{dkkv} - 2\right) \right) \left/ \left(2\,N\lambda\left(\frac{\left(n_{kv} + n_k\right)\ln(2)}{F\ln\left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}}\right)} + 2\,t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv}\right) - 2\right) \right. \end{split}$$

Вероятность своевременной доставки сообщения

 $\label{eq:continuous} $$>Q := (-N*lambda*T[ok]+1)*exp(-N*T[ok]/T[dop])/(T[dop]*(1/T[dop]-lambda+lambda*exp(-N*T[ok]/T[dop])))$

$$Q := \left(-N\lambda \left(\frac{\left(n_{kv} + n_k \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right)$$

$$-\frac{N \left(\frac{\left(n_{kv} + n_k \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right)}{T_{dop}} \right)$$

$$+ 1 \right) e$$

$$-\frac{N \left(\frac{\left(n_{kv} + n_k \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right)}{T_{dop}} \right)$$

$$+ \lambda e$$

$$+ \lambda e$$

 $>R[c] := \kappa *N*lambda$

$$R_c := \kappa N \lambda$$

$$>R[c]^PB := R[c]^Q$$

$$RI_{c} := \left(\kappa N \lambda \left(-N \lambda \left(\frac{\left(n_{kv} + n_{k} \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right) \right)$$

$$- \frac{N \left(\frac{\left(n_{kv} + n_{k} \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right)}{T_{dop}} \right)$$

$$+ 1 \right) e$$

$$- \frac{N \left(\frac{\left(n_{kv} + n_{k} \right) \ln(2)}{F \ln \left(1 + \frac{P_{per}}{P_{hym}} \right)} + 2 t_{pij} + t_{dkk} + t_{dkkv} \right)}{T_{dop}} \right)}{T_{dop}}$$

$$+ \lambda e$$

4.1.3. Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОВВХПСВД)

ИМ ОВВХПСВД — это программа позволяет построить имитационную модель, которая описывает объекты информационного взаимодействия интернета вещей, и может быть использована для экспериментирования в целях проектирования, анализа и оценки функционирования беспроводных сенсорных сетей интернета вещей. Имитационная модель позволит определить, какие параметры влияют на моделируемую систему, как эти параметры влияют на показатели качества обслуживания: вероятностновременные информационного взаимодействия беспроводных сенсорных сетей интернета вещей [71].

Целью применения программы является проверка проведенных ранее на базе аналитической модели численных экспериментов по расчету вероятностно-временных характеристик.

Программа ИМ ОВВХПСВД является сочетанием графического редактора среды Anylogic и языка Java.

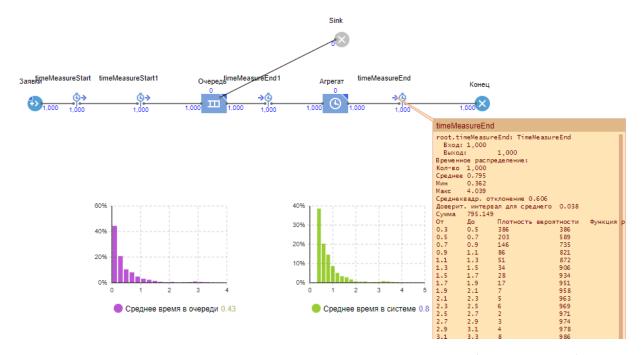


Рисунок 4.1 – Имитационная модель. Интенсивность прибывания сообщений на обслуживание: распределение Пуассона



Рисунок 4.2 – Имитационная модель. Расчет вероятности своевременной доставки сообщений

Программа 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. Имитационная модель представлена на рисунке 6 и включает в себя несколько связанных модулей:

- 1) Заявки поток заявок, поступающих в системе;
- 2) Очередь очередь заявок, ожидающих прием заявок в системе;
- 3) Агрегат устройство обрабатывающие поток заявок;
- 4) 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).

4.2. Результаты экспериментов аналитических моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей

4.2.1. Результаты численных экспериментов модели процесса функционирования беспроводной сенсорной сети интернета веще

Полученные выражения в главе 2 пункт 2.2. позволяют получить зависимости вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик процесса функционирования БСС (процесса доставки сообщения в БСС интернета вещей).

Проведен расчет для следующего набора значений исходных данных: число узлов в БСС N=10~000,~12~000,~15~000; длина передаваемых кадров $n_{\rm K}=256~{\rm бит};$ длина информационной части передаваемых кадров $k=128~{\rm бит};$ длина квитанции $n_{\rm KB}=16~{\rm бит};$ частота радиоканала $B=2,4~{\rm \Gamma\Gamma L};$ среднее допустимое время старения сообщений $\overline{T_{\rm доп}}=80~{\rm c};$ время кодирования и декодирования кадра и квитанции $10^8~{\rm c}.$

На рисунке 4.3 представлены графики зависимости среднего времени доставки сообщений от интенсивности их появления для одного узла БСС (см. рис.4.3 (а)) и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ (см. рис.4.3 (б)) при различных значениях числа узлов в БСС.

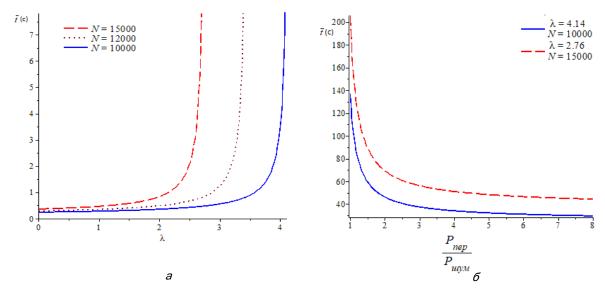


Рисунок 4.3

Из графика, представленного на рис.4.3 (а), видна очевидная закономерность: по мере увеличения числа умных вещей в БСС возникает её перегрузка и сеть теряет эргодичность. Так при числе узлов N=15000 сеть теряет эргодичность при интенсивности равной ~2,7 [сооб/с].

Для увеличения диапазона рабочей интенсивности БСС требуется повышение её пропускной способности. Для того чтобы «вернуть» сети эргодичность можно увеличить скорость передачи или число радиоканалов либо уменьшить нагрузку на БСС (уменьшить интенсивность или число источников нагрузки). Еще одним возможным способом, который часто не учитывается в исследованиях сетей, является улучшение отношения мощности сигнала к мощности шума.

На рисунке 4.3(6) показана зависимость среднего времени доставки от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$. Из графика зависимости видно, что увеличение этого отношения позволяет существенно уменьшить среднее время доставки сообщения в БСС.

Подобную ситуацию иллюстрируют также графики, представленные на рисунках 4.4 и 4.5.

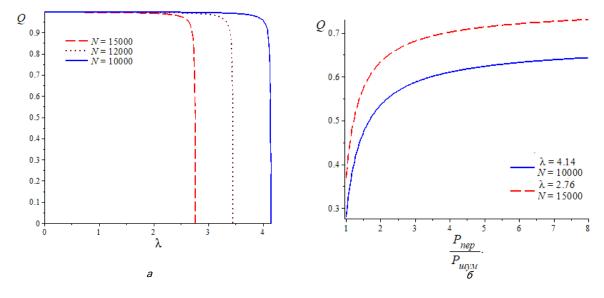


Рисунок 4.4

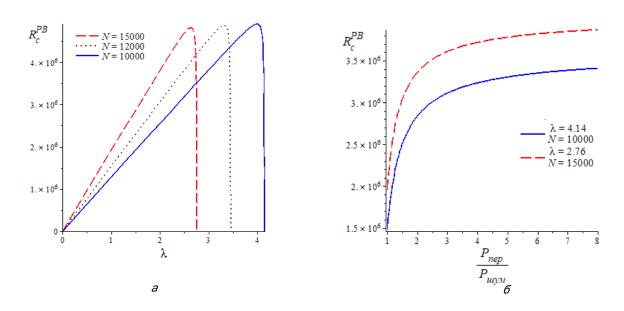


Рисунок 4.5

На рисунке 4.4 показаны графики зависимости вероятности своевременной доставки сообщений от интенсивности сообщений от одного узла БСС (см. рис.(а)) и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ (см. рис.4.4(б)) при различных значениях числа узлов в БСС.

По мере увеличения числа умных вещей в БСС возникает её перегрузка и сеть теряет эргодичность и вероятность того, что сообщение будет

доставлено своевременно стремится к 0. Так, при числе узлов N=15000 сеть теряет эргодичность при интенсивности равной ~2,7 [cooб/c].

Добиться увеличения диапазона рабочих интенсивностей позволяет увеличение отношения мощности сигнала к мощности шума – см. рисунок 4.4(б) и рисунок 4.5(б).

В пункте 2.2 были получены выражения для оценки среднего времени доставки сообщений, вероятности их своевременной доставки и информационной скорости сети реального времени. На основе данных выражений в данном пункте был произведен численный расчет зависимости этих вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах.

4.2.2. Результаты оценки энергетических характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве

Рассматриваются методы оценки характеристик сенсорных сетей, которые являются базовыми для решения всех остальных задач. Во главе угла — оценка энергозатрат сенсорных устройств при разных стратегиях доставки данных от сенсорного устройства до головного узла кластера или до базовой станции в объеме сенсорного поля.

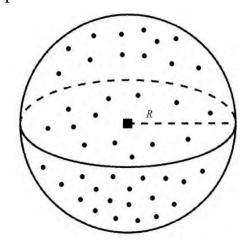


Рисунок 4.6 – Размещение умных вещей в пространстве шара

В поле, саде, теплицах, на ферме и других объектах сенсоры должны наблюдать за состоянием почвы, воздуха, животных, климатических показателей, техники, фиксируя огромное количество разнообразных показателей [52].

Во всех случаях, для образования умного сельскохозяйственного объекта необходимо организовать сеть из большого количества сенсорных устройств 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 сельскохозяйственных угодий является актуальной и имеет практическое значение [91].

От способа ретрансляции зависит энергопотребление устройств и сети в целом. Геопозиционирование позволяет определить расстояние до каждого сенсорного устройства сети.

Передача блока данных непосредственно на базовую станцию без ретрансляций является частным случаем рассматриваемых методов.

Построение моделей для оценки средних расстояний до всех соседей позволит найти среднее расстояние до произвольного сенсорного устройства.

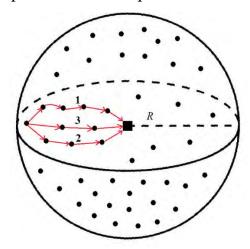


Рисунок 4.7 — Возможные варианты ретрансляций блоков данных (1. ретрансляция ближайшей умной вещи, 2. ретрансляция второй ближайшей умной вещи, 3. ретрансляция третьей ближайшей умной вещи)

Требуемая мощность сигнала на передающей антенне, если предположить, что уровень радиосигнала на приемной антенне постоянен, случайной величиной является И зависит OT расстояния между взаимодействующими устройствами.

Поэтому средняя мощность на передатчике по формуле Фрииса принимает вид [8]:

$$\bar{E}_{nep} = \frac{16}{27} \frac{E_{np} \sqrt[3]{\pi^{10}} \sqrt[3]{4} \sqrt[3]{9} f^2}{\sqrt[3]{\lambda^2} \Gamma \left(\frac{2}{3}\right)^2 C_{np} C_{nep} v_c^2},$$
(4.1)

где \bar{E}_{nep} — средняя мощность радиосигнала на передающей антенне [Bt], E_{np} — постоянная мощность радиосигнала на принимаемой антенне [Bt], C_{nep} — коэффициент усиления передающей антенны, C_{np} — коэффициент усиления приёмной антенны.

Общее время передачи блока данных от сенсорного устройства до базовой станции зависит от количества хопов и определяется выражением [8]:

$$\overline{t} = (k+1) \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2 \cdot f}, \tag{4.2}$$

где b — длина передаваемых блоков (бит), k — количество транзитов (хопов), которые возникают при использовании одних сенсорных устройств для транзита блока данных переданных другими сенсорными устройствами, γ — интенсивность передачи блоков данных одним устройством.

Количество хопов будем считать в сторону увеличения к ближайшему целому числу:

$$k = \left[\frac{R}{2\overline{r}}\right] = \left[\frac{3}{4\sqrt[3]{\pi^2}} \cdot \sqrt[3]{4\sqrt[6]{3}}\sqrt[3]{\lambda}\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)R\right],\tag{4.3}$$

где *R* – радиус шара.

Тогда общее время принимает вид:

$$\overline{t}_{1} = \frac{1}{2} \frac{\left[\left[\frac{3}{4\sqrt[3]{\pi^{2}}} \cdot \sqrt[3]{4\sqrt[6]{3}} \sqrt[3]{\lambda} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) R \right] + 1 \right] \gamma b}{f}.$$

$$(4.4)$$

Средняя энергия, затрачиваемая на передачу блока сенсорного устройства:

$$\overline{e} = \overline{E}_{\text{nep}} \cdot \overline{t} \cdot (4.5)$$

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

$$\overline{e}_{1} = \frac{8}{27} \frac{E_{\text{np}} \sqrt[3]{\pi^{10}} \sqrt[3]{4} \sqrt[3]{9} \left[\left[\frac{3}{4\sqrt[3]{\pi^{2}}} \cdot \sqrt[3]{4} \sqrt[6]{3} \sqrt[3]{\lambda} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) R \right] + 1 \right] \gamma b}{\sqrt[3]{\lambda^{2}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)^{2} C_{\text{np}} C_{\text{nep}} v_{c}^{2}}.$$
(4.6)

Средняя энергия, затрачиваемая на передачу блока второй по расстоянию умной вещи:

$$\overline{e}_{2} = \frac{128}{243} \frac{E_{\text{np}} \sqrt[3]{\pi^{10}} \sqrt[3]{4} \sqrt[3]{9} \left[\left[\frac{9}{16\sqrt[3]{\pi^{2}}} \cdot \sqrt[3]{4} \sqrt[6]{3} \sqrt[3]{\lambda} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) R \right] + 1 \right] \gamma b}{\sqrt[3]{\lambda^{2}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)^{2} C_{\text{np}} C_{\text{nep}} v_{c}^{2}}.$$

$$(4.7)$$

Средняя энергия, затрачиваемая на передачу блока третьему по расстоянию сенсорному объекту:

$$\overline{e}_{3} = \frac{1568}{2187} \frac{E_{\text{np}} \sqrt[3]{\pi^{10}} \sqrt[3]{4} \sqrt[3]{9} \left[\left[\frac{27}{56\sqrt[3]{\pi^{2}}} \cdot \sqrt[3]{4} \sqrt[6]{3} \sqrt[3]{\lambda} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) R \right] + 1 \right] \gamma b}{\sqrt[3]{\lambda^{2}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)^{2} C_{\text{np}} C_{\text{nep}} v_{c}^{2}}.$$

$$(4.8)$$

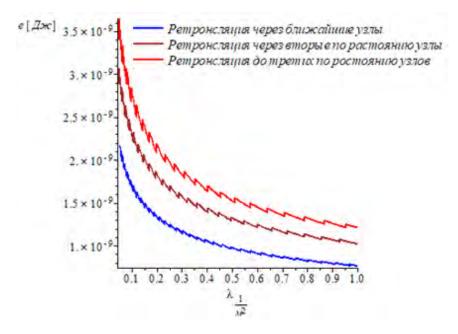


Рисунок 4.8 — Зависимость энергопотребления сенсорных устройств от плотности сенсорного поля

На рисунке 4.8 представлена зависимость энергопотребления от плотности распределения сенсорных устройств в объёме.

При ретрансляции через ближайшие узлы происходит увеличение числа хопов, однако энергия на передачу тратится меньше так как расход энергии пропорционален квадрату расстояния (рис. 4.9).

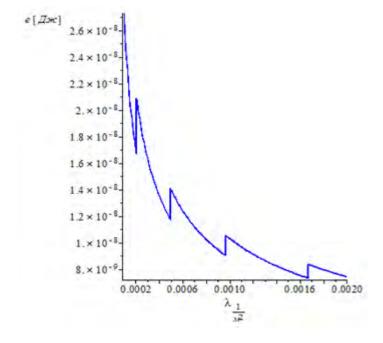


Рисунок 4.9 – Ретрансляция ближайшей умной вещи

Скачкообразный характер функций на рисунках 4.8, 4.9 обусловлен округлением найденных значений хопов до целого.

Таблица 4.1 – Значение энергопотребления сенсорных устройств от плотности сенсорных устройств при значениях частоты сигнала, нДж

Плотность	Частоты сигнала f , Γ ц					
сенсорного поля $\lambda, \frac{1}{M^2}$	$13.56 \cdot 10^6$	$40\cdot 10^6$	2,4·10°	5,5 · 10 ⁹		
0.1	1.71	5.03	302.2	692.6		
0.2	1.33	3.93	236.1	541.1		
0.3	1.15	3.39	203.4	466.1		
0.4	1.06	3.11	187.1	428.8		
0.5	9.81	2.89	173.6	397.9		
0.6	9.1	2.68	161.1	369.1		
0.7	8.58	2.53	151.9	348.2		
0.8	8.19	2.41	145.1	332.4		
0.9	7.89	2.32	139.7	320.1		
1	7.65	2.25	135.4	310.3		

Таблица 4.2—Значение энергопотребления сенсорных устройств от интенсивности передачи блоков данных одним устройством при длине передаваемых блоков, нДж

Интенсивность	Длина передаваемых блоков b, бит					
передачи блоков						
данных одним	64	128	256	512	1024	
устройством						
$\gamma, 6$ лок с						
0.1	0.38	7.61	1.52	3.04	6.08	
0.2	0.76	1.52	3.04	6.08	12.17	
0.3	1.14	2.28	4.56	9.13	18.26	
0.4	1.52	3.04	6.08	12.17	24.34	
0.5	1.9	3.81	7.61	15.21	30.43	
0.6	2.28	4.56	9.13	18.26	36.52	
0.7	2.66	5.32	10.65	21.31	42.61	
0.8	3.04	6.08	12.17	24.34	48.69	
0.9	3.42	6.84	13.69	27.39	54.78	
1	3.81	7.61	15.21	30.43	60.87	

Данные таблиц представляют собой значение пространственных, временных и энергетических характеристик, так как частота и интенсивность является временной характеристикой, а плотность — это пространственная характеристика.

В данном 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 для оценки этих показателей.

Произведен численный анализ энергопотребления беспроводных сенсорных сетей.

4.2.2. Результаты численных экспериментов модели регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей

Проводились численные эксперименты — расчет вероятностновременных характеристик передачи блоков данных от умных вещей 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], $q_1=\frac{1}{15},\ q_2=\frac{1}{3}$, $q_3=\frac{3}{5}$, $T_1=0,1$ [c], $T_2=0,3$ [c], $T_3=0,6$ [c].

На рис. 4.10-4.14 приведены графики иллюстрирующие результаты численных экспериментов. Исследовалось влияние интенсивности поступления блоков данных на передачу, а также введения ограничения объема поступающего трафика (т.е. первой фазы обслуживания), на вероятностно-временные характеристики процесса передачи блоков данных от УВ трех типов в сети доступа последней мили.

Рис. 4.11 — график зависимости вероятностей блокировки блоков данных на первой фазе от интенсивности их поступления от умных вещей всех типов. Он показывает, что для разного типа вещей блокировка будет различной в зависимости от соотношения интенсивности нагрузки и числа

временных каналов, выделенных для вещей соответствующего типа на второй фазе.

Рис. 4.12 — график зависимости интенсивность поступления блоков данных на вторую фазу от интенсивности поступления блоков данных на первую фазу. Этот график иллюстрирует процесс отбрасывания на первой фазе части поступающих от умных вещей блоков — той части, которая не получит качественного обслуживания на второй фазе. Например, для блоков второго типа с учетом наличия двух частотных каналов (Z=2) и доли в общем потоке блоков $q_2=1/3$ при интенсивности $\Lambda=250$ блоков/с, на вторую фазу будет пропущено 95% трафика.

Рис. 4.13 — график зависимости загрузки временных каналов выделенных для передачи блоков данных каждого типа на второй фазе обслуживания от интенсивности поступления блоков данных. Выбранный регулируемый метод доступа позволяет обслуживать блоки одного типа даже в ситуации потери эргодичности во временных каналах других типов. Это обстоятельство иллюстрируют рис. 4.13, на которым представлены графики зависимости: среднего времени задержки — рис. 4.13 (а), вероятности своевременной доставки — рис. 4.13 (б) и информационной скорости сети реального времени — рис. 4.13 (в) блоков данных от интенсивности их поступления на передачу.

На рис. 4.14, показаны те же характеристики только для второго типа УВ: $\bar{t_2}(\Lambda)$ — на рисунке 4.14 (а), $Q_2(\Lambda)$ — на рисунке 4.14 (б) и $R_{PB2}(\Lambda)$ — на рисунке 4.14 (в) для двух случаев — наличие и отсутствие первой фазы (т. е. наличие и отсутствие ограничения объема трафика). Как видно из графиков зависимостей введение процедуры ограничения на первой фазе позволяет повысить устойчивость работы сети по мере увеличения интенсивности поступающих блоков данных. Рабочий диапазон интенсивности поступления блоков больше при условии введения данной процедуры: Λ =0÷400 [блок/с] — без, и Λ =0÷470 [блок/с] с использованием ограничения объема трафика.

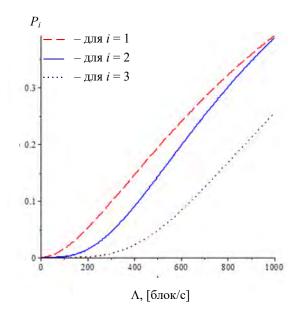


Рисунок 4.10

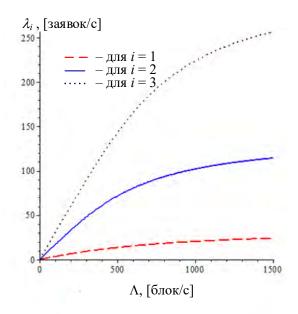


Рисунок 4.11

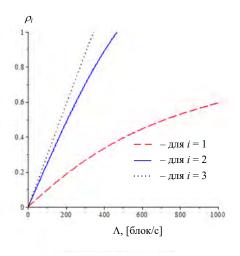
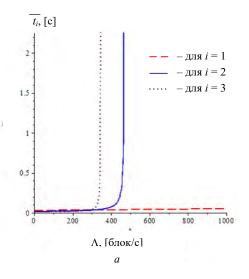
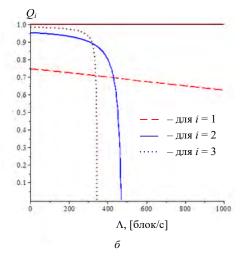


Рисунок 4.12





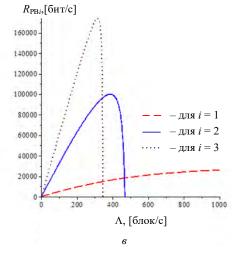


Рисунок 4.13

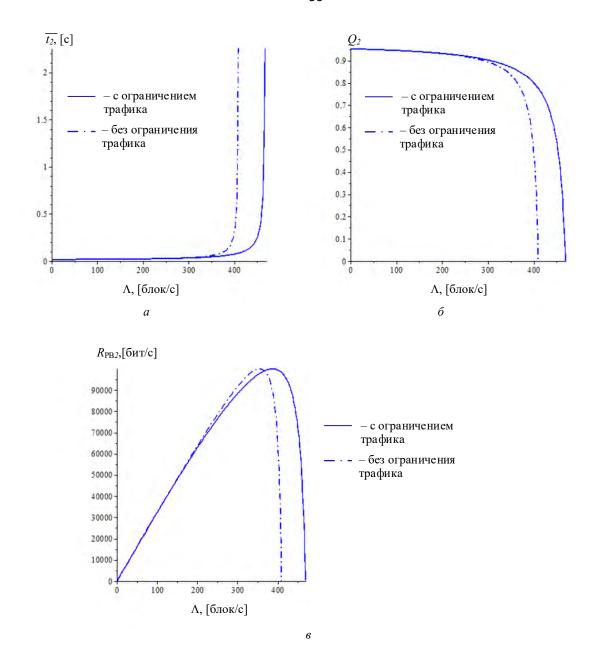


Рисунок 4.14

В работе по предлагаемым протоколам регулируемого множественного доступа к радиоресурсам сети интернета вещей на последней миле, который учитывает особенности: неоднородность поддерживаемых приложений, сверхплотность сетей, необходимость экономии ресурсов компонентов сетей, были проведены численные эксперименты для оценки влияния процедуры ограничения объема трафика на первой фазе обслуживания на качество передачи в сети доступа последней мили — на вероятностно-временные

характеристики процесса передачи блоков данных от умных вещей трех типов, которые проиллюстрировали эффективность использования предложенного протокола и сценария регулируемого множественного доступа. Введение процедуры отсеивания части трафика на первой фазе позволяет увеличить диапазон рабочей интенсивности поступающих на передачу блоков данных.

4.3. Сопоставление результатов экспериментов моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей

Моделирование осуществлялось при следующих исходных данных $\lambda=1$ [cooб/c], $N\cdot T_{\rm ok}=0,362$ [c], $N=15000,\ T_{\rm ok}=0,000024$ [c].

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

— рис. 4.15 — показан график зависимости среднего времени доставки сообщений от интенсивности входного потока сообщений и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}\,;$

— рис. 4.16 — показан график зависимости вероятности своевременной доставки сообщений от интенсивности входного потока сообщений и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$.

Анализ показанных графиков (рис. 4.15, 4.16) характеристик информационного взаимодействия показал состоятельность (корректность) разработанной имитационной модели.

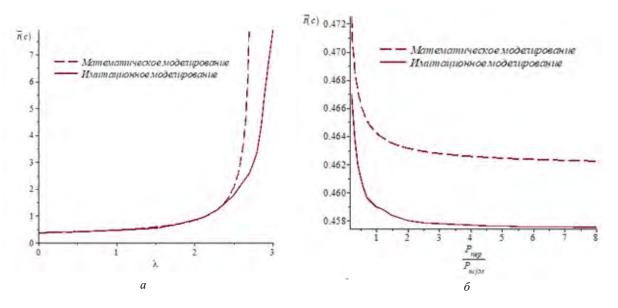


Рисунок 4.15 – Графики зависимости среднего времени доставки сообщений: а) от интенсивности сообщений, б) от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$

Из графика, представленного на рис.4.15 (а), видно, что согласно численных расчетов, проведенных на базе математической модели, рост интенсивности сообщений ведет к увеличению среднего времени доставки сообщений в БСС и сеть теряет эргодичность при интенсивности сообщений ~2.5 равной $[\cos(c)]$. 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 ~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 4.15 (б) показаны графики зависимости среднего времени доставки от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ 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 $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$. Можно заметить, что увеличение

отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ позволяет существенно уменьшить среднее время доставки

сообщения в БСС.

Корректность разработанной имитационной модели иллюстрирует также график, представленный на рисунке 4.16.

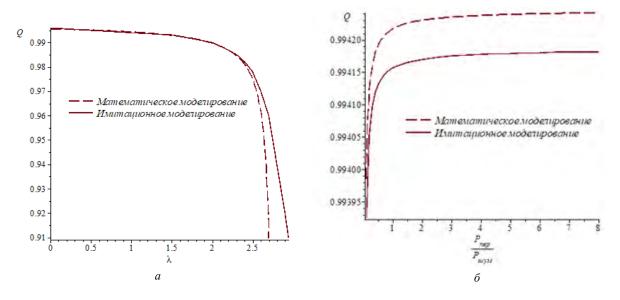


Рисунок 4.16 – График зависимости вероятности своевременной доставки сообщений а) от интенсивности сообщений, б) от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{шум}}$

На графиках (Рис. 4.17(а)), представлено сравнение проведенных экспериментов имитационного моделирования одноканальной (M/D/1) и многоканальных эфирных сред передачи данных (M/D/2, M/D/5). Из всех графиков видно, что рост интенсивности сообщений ведет к увеличению среднего времени доставки сообщений в БСС. Также рост числа каналов ведет к увеличению рабочего диапазона интенсивностей сообщений.

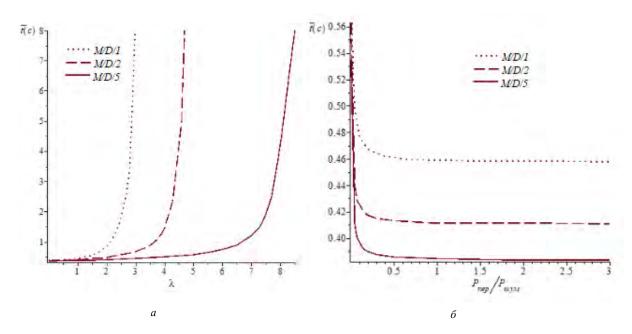


Рисунок 4.17 — График зависимости среднего времени доставки сообщений: а) от интенсивности сообщений, б) от отношения $P_{\text{пер}}/P_{\text{пиум}}$

На рисунке 4.17(б) показаны графики зависимости среднего времени доставки от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ построенные по результатам проведения имитационных экспериментов, в сравнение с многоканальной эфирной средой передачи данных. Графики имеют похожий характер: при интенсивности потока входных сообщений от 0 до 0,1 [сооб/с] графики зависимостей совпадают — идет незначительное уменьшение среднего времени доставки сообщений, а затем, при ~0,1 [сооб/с] начинается существенное отклонение от графика M/D/1. Можно заметить, что увеличение отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$ позволяет значительно уменьшить среднее время доставки сообщения в БСС.

Имитационная модель БСС интернета вещей, позволит проводить эксперименты и анализировать влияние параметров БСС (интенсивности генерируемых сообщений, числа каналов, мощности передаваемых сигналов, времени обслуживания) на характеристики (среднее время и вероятность своевременной доставки сообщений).

Рассмотрена многоканальная эфирная среда передачи — M/D/N, а также одноканальная СМО с накопителем неограниченной ёмкости, в которую поступает однородный поток заявок с экспоненциальным распределением интервалов времени между последовательными заявками (простейший поток).

Имитационное моделирование системы доступа с приоритетным обслуживанием

Исходные данные для расчета использовались следующие n=128~6um. При проведении эксперимента интенсивность менялась от 0 до 20000, результаты можем наблюдать на 4.18–4.20 рисунках. P_1 – сенсорный узел с высоким приоритетом, P_2 – сенсорный узел со средним приоритетом, P_3 – сенсорный узел с низким приоритетом.

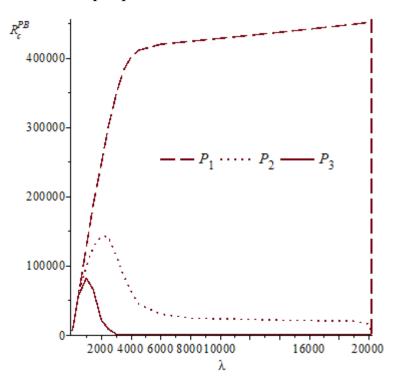


Рисунок 4.18 – График зависимости информационной скорости сети реального времени от интенсивности сообщений

График на рисунке 4.18 показывает реально проходящий пропускаемый информационный поток на единицу времени.

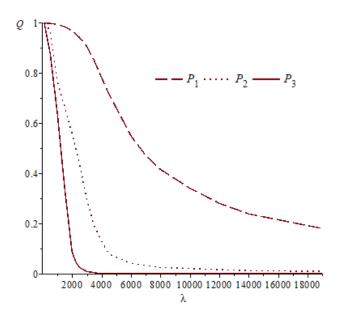


Рисунок 4.19 – График зависимости вероятности своевременной доставки сообщений

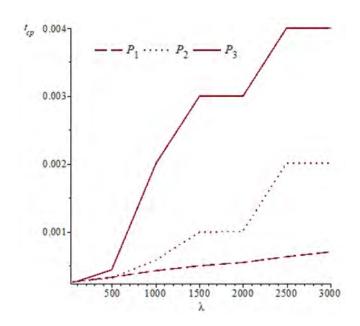


Рисунок 4.20 – График зависимости среднего времени доставки сообщений от интенсивности сообщений

Исходя из различных условий, модель позволяет настраивать режимы, которые бы устраивали все варианты потоков данных. В модели можно найти подходящий диапазон с учетом требований к времени доставки.

4.4. Выводы по главе

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. Было проведено сопоставление результатов экспериментов моделей оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей.

На основе предложенных 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;
- 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;
- 3) рассчитать вероятностно-временные характеристики передачи блоков данных от УВ трех типов (т. е. I = 3) в беспроводной сенсорной сети интернета вещей.

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

- зависимость среднего времени доставки сообщений от интенсивности входного потока сообщений и от отношения мощностей $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$;
- зависимость вероятности своевременной доставки сообщений от интенсивности входного потока сообщений и от отношения $\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{шум}}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общим результатом работы является:

- 1. Разработана модель процесса функционирования беспроводной сенсорной сети интернета вещей, которая учитывает протоколы функционирования сети на физическом и канальном уровнях. Данная модель отражает взаимное влияние вероятностно-временных и вероятностноэнергетических характеристик информационного взаимодействия умных вещей в эфирной среде, и позволяющие найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии. В модели получены зависимости среднего времени и вероятности своевременной доставки сообщений, формируемых умными вещами, и информационной скорости реального времени эфирной сети от мощности радиосигнала на передающей антенне. Модель предполагает, что на физическом уровне передаваемые сигналы подвергаются воздействию белого шума, на канальном уровне используется протокол синхронного-временного множественного доступа узлов к общей среде передачи.
- 2. Разработана модель для оценки характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве умных вещей. Модель учитывает в комплексе такие пространственные, временные и энергетические характеристики сенсорной сети, как 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 сообщений.
- 3. Разработана модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей. Модель, позволяет оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов. Модель предназначена для расчета вероятностно-временных характеристик процесса

передачи различных типов данных умными вещами IoT: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, а также информационной скорости реального времени. Программа рассчитывает и анализирует влияние параметров регулируемого множественного доступа на вероятностно-временные характеристики процесса передачи в шеринговой сети множественного доступа.

- 4. 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

GPSS – General Purpose Simulation System – система моделирования общего назначения.

ІоТ – Интернет вещей.

БСС – Беспроводная сенсорная сеть.

ВВХ – Вероятностно временные характеристики.

ВСС – Всепроникающие сенсорные сети.

ИИ – Искусственный интеллект.

ИМ – Имитационное моделирование.

ПЛС – Преобразования Лапласа-Стилтьеса.

СМО – Система массового обслуживания.

СЦТ – «Сквозные» цифровые технологии.

УВ – Умные вещи.

ЭВМ – Электронно-вычислительная машина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
- 2. Андреев, Ю. С. Промышленный интернет вещей / Ю. С. Андреев, С. Д. Третьяков. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. 54 с.
- 3. Апанасенко, А. А. Промышленный интернет вещей (ПоТ) как инструмент стратегии "индустрия 4.0" / А. А. Апанасенко // Закономерности, тенденции и перспективы развития информационной экономики XXI века: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Магнитогорск, 30 марта 2021 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. С. 132-136.
- 4. Астахова, Т. Н. Умное сельскохозяйственное поле на основе интернета вещей/ Т. Н. Астахова, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Региональная информатика и информационная безопасность. Сб. трудов. Выпуск 5 / СПОИСУ. СПб, 2018. С. 201–202.
- 5. Астахова Т. Н., Колбанев М. О., Романова А. А., Верзун Н. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664458 Российская Федерация. Расчет характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями на первой фазе (MASWOLFP) : № 2020660132 : заявл. 09.09.2020 : опубл. 13.11.2020 / заявитель Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
- 6. Астахова Т. Н., Колбанев М. О., Романова А. А., Шамин А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

- 2019666925 Российская Федерация. Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ECMAN) : № 2019665698 : заявл. 02.12.2019 : опубл. 17.12.2019 / заявитель Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
- 7. Астахова, Т. Н. Децентрализованная цифровая платформа сельского хозяйства / Т. Н. Астахова, М. О. Колбанев, А. А. Шамин // Вестник НГИЭИ. 2018. №6 (85). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/detsentralizovannaya-tsifrovaya-platforma-selskogo-hozyaystva (дата обращения: 21.12.2021).
- 8. Астахова, Т. Н. Вероятностно-энергетические характеристики взаимодействия умных вещей/ Т. Н. Астахова, Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, Н. А. Полянская, А. А. Шамин //Вестник НГИЭИ. 2019. № 4 (95). С. 66-77.
- 9. Астахова, Т. Н. Взаимовлияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик беспроводных сенсорных сетей / Т. Н. Астахова, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы V межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 24–28 сентября 2019 года / Севастопольский государственный университет; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2019. С. 241-242.
- 10. Астахова, Т. Н. Модель управления ресурсами взаимодействия кибертехнических систем / Т. Н. Астахова, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021): Материалы XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 27—29 ноября 2021 года. Санкт-Петербург: Региональная общественная

организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. – C. 210-211.

- 11. Астахова, Т. Н. Энергетическая безопасность всепроникающих сенсорных сетей / Т. Н. Астахова, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Региональная информатика (РИ-2020) : XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 года. Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2020. С. 120-121.
- 12. Багаева, А. И. Сквозные технологии цифровой трансформации экономики / А. И. Багаева, Х. Х. Атуева, М. С. Эскиева, М. Х. Темиралиева // Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты: Труды II Международной научно-практической конференции, Брянск, 19 ноября 2019 года. Брянск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный инженернотехнологический университет", 2019. С. 65-68.
- 13. Бегишев И. Р. Сквозная цифровая технология" Компоненты робототехники и сенсорика": глоссарий понятий. Свидетельство о государственной регистрации базы данных№ RU 2020622176 от 06.11. 2020 //Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). 2020. №. 11.
- 14. Беспроводные сенсорные сети: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации (степени) бакалавр, магистр / Б. Я. Лихтциндер, Р. В. Киричек, Е. Д. Федотов [и др.]; Под общей редакцией Б.Я. Лихтциндера. Москва: Научнотехническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2020. 236 с. ISBN 978-5-9912-0822-2.

- 15. Богданов, И. А. Анализ особенностей обеспечения сетевой безопасности во всепроникающих сенсорных сетях / И. А. Богданов, А. Е. Кучерявый //ÂÛÏÓÑÊ 2.-2013.
- 16. Боев, В. Д. Имитационное моделирование систем: учебное пособие для вузов/ В. Д. Боев // Москва: Издательство Юрайт, 2022. 253 с. URL: https://urait.ru/bcode/492781 (дата обращения: 24.05.2022).
- 17. Боев, В. Д. Моделирование в среде AnyLogic : учебное пособие для вузов / В. Д. Боев // Москва : Издательство Юрайт, 2022. 298 с. URL: https://urait.ru/bcode/491955 (дата обращения: 24.05.2022).
- 18. Боровков А. И. и др. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии" Новые производственные технологии". Результаты и перспективы //Инновации. 2019. №. 11 (253). С. 89-104.
- 19. Вегнер, А. И. Сквозные технологии цифровой экономики / А. И. Вегнер, // Современные технологии принятия решений в цифровой экономике : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Юрга, 15–17 ноября 2018 года. Юрга: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2018. С. 89-91.
- 20. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Задачи и упражнения по теории вероятностей: Учеб. пособие для студ. вузов 5-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 448 с.
- 21. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Коршунов И. Л., Микадзе С. Ю. Основы моделирования информационных систем множественного доступа: уч. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2015. 142 с.
- 22. Верзун, Н. А. Технологии Интернета вещей / Н. А. Верзун, А. И. Воробьев, М. О. Колбанев. Санкт-Петербург, : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2020. 91 с. ISBN 978-5-7310-4888-0.

- 23. Верзун, Н. А. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 10. С. 20-27.
- 24. Верзун, Н. А. Оценка энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 10. С. 34-38.
- 25. Верзун, Н. А. Двухфазная модель множественного доступа в эфирных сетях / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: Материалы круглых столов VI межрегиональной научнопрактической конференции, Севастополь, 22–26 сентября 2020 года. Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. С. 50-51.
- 26. Верзун, Н. А. Имитационное моделирование информационного взаимодействия в кибертехнической системе / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021): Материалы XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 27–29 ноября 2021 года. Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. С. 211-212.
- 27. Верзун, Н. А. Показатели эффективности процесса информационного взаимодействия в сети интернета вещей / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. № 3. С. 5-14. DOI 10.32603/2071-8985-2022-15-3-5-14.
- 28. Верзун, Н. А. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. В. Омельян // Омский научный вестник. -2016. № 4(148). С. 147-151.

- 29. Верзун, Н. А. Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks : учебное пособие / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. В. Омельян // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2016. 51 с. ISBN 978-5-7310-3640-5.
- 30. Вишневский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. / В. М. Вишневский //Москва: Техносфера, 2003. 512 с.
- 31. Воробьев, А. И. Модель оптимизации энергопотребления умными вещами / А. И. Воробьев, А. М. Колбанев, М. О. Колбанев // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2015. № 7. С. 46-49.
- 32. Вьюненко Л. Ф., Михайлов М. В., Первозванская Т. Н. Имитационное моделирование : Учебник и практикум /. 1-е изд.. Москва : Издательство Юрайт, 2017. 283 с.
- 33. Галкин, П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей/ П. В. Галкин // Scientific Journal «ScienceRise» №2(2) 2014. с. 55-61.
- 34. Гребешков, А. Ю. Разработка классификатора устройств БСС для анализа отказов c помощью машинного обучения учителем / А. Ю. Гребешков, Я. М. Кузнецов // V Научный форум телекоммуникации: теория и технологии TTT-2021 : Материалы XXIII Международной научнотехнической конференции, Самара, 23–26 ноября 2021 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций И информатики, 2021. – С. 109-110.
- 35. Гревцев, А. С. Умный интернет вещей / А. С. Гревцев, Т. В. Киселева // Студенческая наука для развития информационного общества : Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции, Ставрополь, 05–10 декабря 2016 года. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2016. С. 244-246.
- 36. Гришин, М. С. Тактильный Интернет / М. С. Гришин // Технологии. Инновации. Связь: Сборник материалов научно-практической конференции,

Санкт-Петербург, 19 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ВОЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ ИМЕНИ МАРШАЛА СОВЕТСКОГО СОЮЗА С. М. БУДЕННОГО" МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, 2022. – С. 211-216.

- 37. Гулин, К. А. Тренды четвертой промышленной революции / К. А. Гулин, В. С. Усков //Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. -2017. N5 (53). C. 216-221.
- 38. Верзун, Н. А. Двухфазная модель множественного доступа к инфокоммуникационным ресурсам / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Региональная информатика (РИ-2020) : XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 года. Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2020. С. 66-67.
- 39. Довгаль, В. А. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2018. №1 (212). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-kontseptsiya-prilozheniya-i-zadachi (дата обращения: 21.12.2021).
- 40. Емельянов, А. А. Моделирование информационных технологий на GPSS / А. А. Емельянов // Прикладная информатика. 2007. № 2(8). С. 83-109.
- 41. Имитационное моделирование URL: https://studopedia.ru/28_36181 _imitatsionnoe-modelirovanie.html (дата обращения 12.02.2020).
- 42. Имитационное моделирование AnyLogic Simulation Software URL: https://www.anylogic.com/use-of-simulation/ (дата обращения 12.02.2020).

- 43. Росляков, А. В. Интернет вещей / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков, М. Ю. Самсонов. Самара : Ас Гард, 2014. 342 с.
- 44. Интернет вещей // Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva. June 2012.
- 45. Верзун, Н. А. Использование в учебном процессе программы расчета характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2021. Т. 1. С. 239-241.
- 46. Верзун, Н. А. Использование пакета Марlе при проведении лабораторного практикума по дисциплине «Инфокоммуникационные системы и сети» / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2020. Т. 1. С. 186-187.
- 47. Карелин, В. Π. Интеллектуальные технологии системы искусственного интеллекта ДЛЯ поддержки принятия решений В. П. Карелин// ТИУиЭ. 2011. No2. URL: Вестник https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-tehnologii-i-sistemyiskusstvennogo-intellekta-dlya-podderzhki-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 21.12.2021).
- 48. Касаткин, В. В. Модель информационного взаимодействия и примеры ее применения / В. В. Касаткин, М. О. Колбанев, Т. М. Татарникова // Региональная информатика и информационная безопасность : Сборник трудов, Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 года / Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления.
- Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2016. С. 35-39.

- 49. Кирилова, Д. А. Маслов Н. С., Рейн А. Д. Blockchain, как новая технология для разработки / Д. А. Кирилова, Н. С. Маслов, А. Д. Рейн // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 1. С. 34-38.
- 50. Кобелев Н. Б., Половников В. А., Девятков В. В. Имитационное моделирование: Учебник /. 2-е изд.. Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУРС», 2020. 352 с.
- 51. Кожанов Ю.Ф., Колбанёв М.О. Технология инфокоммуникации. Курск: Науком, 2011. 260 с.
- 52. Колбанёв, М. О. О построении умного поля/ М. О. Колбанёв, А. А. Романова //Перспективные направления развития отечественных информационных технологий материалы IV межрегиональной научнопрактической конференции. Севастопольский государственный университет; науч. ред. Б. В. Соколов. 2018. С. 77-78.
- 53. Колбанёв, М. О. К вопросу о сущности и технологиях интернета вещей. / М. О. Колбанёв, Н. А. Верзун, Е. С. Нестеренко //Теоретическая экономика. 2020. № 5 (65). С. 36-43.
- 54. Колбанев, М. О. Принципы построения и анализ вероятностновременных характеристик центров обработки информации и управления интеллектуальных телекоммуникационных сетей : специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)", 05.13.13 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Колбанев Михаил Олегович. Санкт-Петербург, 2003. 388 с.
- 55. Колыбельников, А. И. Обзор технологий беспроводных сетей / А. И. Колыбельников, // Труды МФТИ. 2012. №2-14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologiy-besprovodnyh-setey (дата обращения: 21.12.2021).
- 56. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. Учебное пособие. /— СПб, изд. РГГМУ, 2012 136 с.

- 57. Кутузов, О. И. Решение одной задачи размещения сенсорных устройств в сетях интернета вещей / О. И. Кутузов, Т. М. Татарникова, И. Н. Дзюбенко // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2018. № 6. С. 15-20.
- 58. Кучерявый, А. Е. Самоорганизующиеся сети. / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый //СПб.: Любавич. 2011. 312 с.
- 59. Кучерявый, Е. А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей / Е. А. Кучерявый, С. А. Молчан, В. В. Кондратьев // Электросвязь. $2006. \mathbb{N} \ 6. \mathbb{C}.\ 10$ -15.
- 60. Верзун, Н. А. Лабораторная работа «Оценка энергетических характеристик интернета вещей» / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова, В. В. Цехановский // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2019. Т. 1. С. 359-361.
- 61. Липецкая, М. С. Проблемы использования существующих коммуникационных технологий в системах Интернета вещей / М. С. Липецкая, А. М. Мельниченко, А. М. Тюрликов // Актуальные проблемы экономики и управления. 2019. № 4(24). С. 56-59.
- 62. Макаров, В. В. Сквозные технологии цифровой экономики / В. В. Макаров, А. А. Асеев, Н. К. Устриков // Инновационная траектория развития современной науки: становление, развитие, прогнозы: сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 02 февраля 2020 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2020. С. 8-12.
- 63. Математические модели в сетях связи : учебное пособие : часть 1 /А. И. Парамонов, М. А. Маколкина, Р. В. Киричёк, А. И. Выборнова, Е. Г. Богданова ; СПбГУТ. СПб., 2018 111 с.
- 64. Мелихова, Ю. А. Интернет вещей: безопасность умных вещей / Ю. А. Мелихова, Д. В. Анаденков // Современные информационные технологии и информационная безопасность : Сборник научных статей

- Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 17 мая 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 8-12.
- 65. Москаленко, Т. А. Архитектуры промышленного интернета вещей / Т. А. Москаленко, Р. В. Киричек, А. С. Бородин //Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. №. 4. С. 49-56.
- 66. Назаренко, Ю. Л. Обзор технологии "большие данные" (Big Data) и программно-аппаратных средств, применяемых для их анализа и обработки / Ю. Л. Назаренко // European science. 2017. №9 (31). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologii-bolshie-dannye-big-data-i-programmno-apparatnyh-sredstv-primenyaemyh-dlya-ih-analiza-i-obrabotki (дата обращения: 21.12.2021).
- 67. Наралиев, Н. А. Обзор и анализ стандартов и протоколов в области Интернет вещей. Современные методы тестирования и проблемы информационной безопасности IoT / Н. А. Наралиев, Д. И. Самаль // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 8. С. 94-104.
- 68. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебное пособие для студентов вузов. 4-е изд.. Москва [и др.] : Питер, 2010. 943 с.
- 69. Олифер, В. Г. Олифер. Н. А. Основы сетей передачи данных : учебное пособие / 3-е изд. Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2021. 219 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/102041.html (дата обращения: 30.05.2021)
- 70. Параскевов, А. В. Современная робототехника в России: реалии и перспективы (обзор) / А. В. Параскевов, А. В. Левченко //Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. №. 104. С. 1680-1701.
- 71. Романова А. А., Колбанев М. О., Верзун Н. А., Мещеряков Е. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

- 2022617589 Российская Федерация. Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОВВХПСВД) : № 2022616716 : заявл. 18.04.2022 : опубл. 22.04.2022 заявитель Государственное бюджетное образовательное образования учреждение Нижегородский государственный высшего инженерно-экономический университет.
- 72. Романова, А. А. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей / А. А. Романова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022 Т. 15, № 8 С. 69–76. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-8-69-76.
- 73. Росляков, А. В. Интернет вещей: Учебное пособие / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. 135 с.
- 74. Росляков, А. В. Интернет вещей: обзор эталонных архитектурных моделей / А. В. Росляков, А. А. Кирьяков // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 4. С. 382-395. DOI 10.18469/ikt.2021.19.4.01.
- 75. Салимьянов, И. Т. Программирование на языке Python / И. Т. Салимьянов, В. Т. Якупова //Казанский национальный исследовательский технологический университет. Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Редакционно-издательский центр "Школа", 2019. 90 с. ISBN 978-5-00162-035-8.
- 76. Советов, Б. Я. Моделирование систем : Учебник / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. 7-е изд.. Москва : Издательство Юрайт, 2019. 343 с. (Бакалавр. Академический курс). ISBN 978-5-9916-3916-3.
- 77. Сорокин, А. А. Модель для разработки протоколов маршрутизации в системах связи с дипломатической топологией сети / А. А. Сорокин, В. Н. Дмитриев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 3(60). С. 156-160.

- 78. Татарникова, Т. М. Имитационная модель оценки срока службы интернета вещей в условиях атакующих воздействий, источающих энергию узлов / Т. М. Татарникова, П. Ю. Богданов // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 4. С. 564–571. DOI: 10.15827/0236-235X.136.564-571.
- 79. Татарникова, Т. М. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети интернета вещей / Т. М. Татарникова, М. А. Елизаров // Информационноуправляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 44-50.
- 80. Татарникова, Т. М. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей / Т. М. Татарникова, И. Н. Дзюбенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. T. 18. Note 5. C. 843-849. DOI <math>10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849.
- 81. Татарникова, Т. М. Система контроля доступа в помещения с применением технологии Интернета вещей / Т. М. Татарникова, А. В. Иванова // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXIII международной научной конференции, Санкт-Петербург, 01–05 июня 2020 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. С. 344-348.
- 82. Уоллес Р. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? // Новости электроники. 2015. № 11. С.3–13.
- 83. Федотова, В. В. Понятие блокчейн и возможности его использования / В. В. Федотова, Б. Г. Емельянов, Л. М. Типнер // European science. 2018. №1 (33). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-blokcheyn-i-vozmozhnosti-ego-ispolzovaniya (дата обращения: 21.12.2021).
- 84. Филипова, И. А. Нейротехнологии: развитие, применение на практике и правовое регулирование / И. А. Филипова // Вестник СПбГУ. Серия 14. Право. 2021. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyrotehnologii-razvitie-primenenie-na-praktikei-pravovoe-regulirovanie (дата обращения: 21.12.2021).

- 85. Фялковский, Е. Е. Использование имитационного моделирования для решения задач реинжиниринга бизнес-процессов в среде моделирования Anylogic / Е. Е. Фялковский // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2021. Т. 8. № 1. С. 67-75. DOI 10.25206/2311-4908-2021-8-1-67-75.
- 86. Цифровая экономика Российской Федерации [Электронный ресурс] URL: https://digital.ac.gov.ru/.
- 87. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 830 с.
- 88. Ядровская, М. В. Перспективы технологии интернета вещей / М. В. Ядровская, М. В. Поркшеян, А. А. Синельников // Advanced Engineering Research. 2021. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-tehnologii-interneta-veschey (дата обращения: 06.04.2022).
- 89. Ястребова А. А., Выборнова А. И., Киричек Р. В. Обзор концепции тактильного интернета и технологий для его реализации / А. А. Ястребова, А. И. Выборнова, Р. В. Киричек //Информационные технологии и телекоммуникации. -2016. Т. 4. N2. 4. С. 89.
- 90. Astakhova, T. Romanova A., Kolbanev M. Energy consumption of sensor devices in three-dimensional space of agricultural land // CEUR Workshop Proceedings: 11, Saint Petersburg, 12–13 декабря 2019 года. Saint Petersburg, 2020.
- 91. Bogatyrev A. V., Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., "Multipath Redundant Transmission with Packet Segmentation," 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840643.
- 92. Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2018.

- 93. Bogatyrev V. A., Vinokurova M. S. Control and Safety of Operation of Duplicated Computer Systems. Communications in Computer and Information Science, IET, 2017. Vol. 700, pp. 331-342.
- 94. Buratti C. et al. An overview on wireless sensor networks technology and evolution //Sensors. 2009. T. 9. №. 9. C. 6869-6896.
- 95. Dias G. M., Bellalta B., Oechsner S. A survey about prediction-based data reduction in wireless sensor networks //ACM Computing Surveys (CSUR). 2016. T. 49. № 3. C. 1-35.
- 96. Galkin, P. V., Karlovsky, D. V. (2010). Features of realization of off-wire sensory networks on the basis of technology of ZigBee. VII Międzynarodowej naukowiipraktycznej konferencji «Nauka i inowacja-2011», 31, 7–11.
- 97. Krasnova A. et al. Digital twin as a driver of digitalization of organizations' activities and creation of digital models //E-business technologies conference proceedings. $-2022. T. 2. N_{\odot}. 1. C. 65-69.$
- 98. Shaw, J. A.: Radiometry and the Friis transmission equation. American journal of physics 81(1), 33{37 (2013). https://doi.org/10.1119/1.4755780.
- 99. Verdone R. et al. Wireless sensor and actuator networks: technologies, analysis and design. Academic Press, 2010.
- 100. Verzun, N. Romanova A., Kolbanev M. Two-phase model of information interaction in a heterogeneous internet of things network at the last mile // CEUR Workshop Proceedings: 12, Saint Petersburg, 10–11 декабря 2020 года. Saint Petersburg, 2020.
- 101. Wallace, R.: Maximum communication range over a radio channel in a system: how to achieve this? Electronics News 11, 3{13 (2015).

приложения а

Программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU2019666925



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2019666925
Дата регистрации: 17.12.2019
Номер и дата поступления заявки: 2019665698 02.12.2019
Дата публикации и номер бюллетеня: 12.12.2019 Free M. 12

Дата публикации и номер бюлле 17.12.2019 Бюл. № 12 Контактные реквизиты: ngiei-126@majl.ru Автор(ы): Астахова Татьяна Николаевна (RU), Колбанев Михаил Олегович (RU), Романова Анна Александровна (RU), Шамин Алексей Анатольевич (RU)

Правообладатель(и): Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ЕСМАN)»

Реферат:

Программа предназначена для расчета зависимости вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах. Программа отражает взаимное влияние вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия умных вещей в эфирной среде, позволяющие найти баланс между качеством обслуживания и затратами электроэнергии. Программа является расширением интегрированного математического пакета Maple. Программа позволяет: оценить среднее время доставки сообщений, вероятность их своевременной доставки и информационную скорость сети реального времени; определить зависимость вероятностно-временных характеристик от мощности сигнала на передающих антеннах.

Язык программирования: Марle, версии от 6 до 18.

Объем программы для ЭВМ: 680 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2020664458

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства); 2020664458

Дата регистрации: 13.11.2020 Номер и дата поступления заявки:

2020660132 09.09.2020 Дата публикации и номер бюллетеня:

13.11.2020 Бюл. № 11 Контактные реквизиты:

нет

Автор(ы):

Астахова Татьяна Николаевна (RU), Колбанев Михаил Олегович (RU), Романова Анна Александровна (RU), Верзун Наталья Аркадьевна (RU)

Правообладатель(и):

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Расчет характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями на первой фазе (MASWOLFP)

Реферат:

Программа предназначена для расчета вероятностно-временных характеристик процесса передачи различных типов данных умными вещами IoT: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, а также информационной скорости реального времени. Тип ЭВМ: IBM PC-совместимые ПК; ОС: Windows XP и старше.

Язык программирования: Марle (версии от 6 до 18)

Объем программы для ЭВМ: 730 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022617589

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2022617589

Дата регистрации: 22.04.2022 Номер и дата поступления заявки:

2022616716 18.04.2022 Дата публикации и номер бюллетеня:

22.04.2022 Бюл. № 5 Контактные реквизиты:

нет

Автор(ы):

Романова Анна Александровна (RU), Колбанев Михаил Олегович (RU), Верзун Наталья Аркадьевна (RU), Мещеряков Евгений Евгеньевич (RU)

Правообладатель(и):

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ) (RU)

Название программы для ЭВМ:

Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОВВХПСВД)

Реферат

Программа позволяет рассчитывать и анализировать влияние параметров беспроводной сенсорной сети Интернета вещей, представленной в виде системы множественного доступа на вероятностно-временные характеристики: количество заявок в очереди, среднее время нахождения заявки в очереди, количество заявок, покинувших систему и среднее время заявок в системе в целом. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows 7 и выше.

Язык программирования: сочетание графического редактора среды Anylogic и

языка Java

Объем программы для ЭВМ: 63,6 КБ

приложения б

Документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКИ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (ГБОУ ВО НГИЭУ)

606340 Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а

УТВЕРЖДАЮ Ректор НГИЭУ.

профессор

.Е. Шамин 20*Ы*г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим удостоверяется, что результаты научных исследований соискателя Романовой Анны Александровны по теме «Модели и методы оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей» используется в учебном процессе со студентами, обучающимися по направлению: 09.04.02 Информационные системы и технологии (магистратура).

Материалы используются для выполнения индивидуальных заданий и выпускных квалификационных работ, при чтении лекций, проведения практических занятий по дисциплине «Цифровые платформы информационных и коммуникационных технологий».

Результаты материалов исследования опубликовано в 26 печатных работ, из них 5 статей публиковались в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 2 публикации в изданиях индексируемых в базе SCOPUS, имеется 3 свидетельства государственной регистрации программ: Программа расчета энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях (ECMAN); Программа расчета характеристик двухфазной системы множественного доступа с явными потерями на первой фазе (MASWOLFP). Имитационная модель оценки вероятностно-временных характеристик процесса синхронно-временного доступа (ИМ ОВВХПСВД).

Проректор по научной работе и инновационному развитию, к.э.н., доцент

Директор института «Информационные технологии и системы связи» к.э.н., доцент

Зав.кафедрой «Информационные системы и технологии», к. ф-м. н., доцент

Ганин Д. В.

Шамин А.А.

Астахова Т. Н.



Общество с ограниченной ответственностью «Открытые Лаборатории»

603122, г. Нижний Новгород, ул. Ванеева, д. 205, офис 300 ИНН 5262375729, КПП 526201001, ОГРН 1205200048195 Email: info@open-labs.ru

> УТВЕРЖДАЮ Генеральный Директор

A. Γ. Севастьянов oure Suce 20 Ar.

AKT

боратории

О внедрении результатов диссертационной работы Романовой Анны Александровны на тему «Модели и методы оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей»

Комиссия в составе:

- 1. Генерального директора ООО «Открытые Лаборатории» Севастьянова Алексея Геннадьевича;
- 2. Руководителя проектов ООО «Открытые Лаборатории» Ветчинкина Антона Геннадьевича;
- 3. Ведущего инженера-программиста ООО «Открытые Лаборатории» Алейникова Филиппа Валентиновича.

Установила, что при выполнении проекта по разработке программного обеспечения для интеллектуальной системы управления промышленным освещением в ООО «Открытые Лаборатории» использованы следующие научные результаты диссертационной работы Романовой А.А.:

- 1. Комплекс аналитических моделей информационного взаимодействия в беспроводной сенсорной сети интернета вещей.
- 2. Модель оценки энергетических характеристик сенсорных устройств в трехмерном пространстве.
 - 3. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей.



. Применение в проекте для интеллектуальной системы управления промышленным освещением научных результатов Романовой А.А. позволило оценить вероятностно-временные, а также энергетические характеристики реализации устройств интернета вещей.

Председатель комиссии:

Генеральный директор

ООО «Открытые Лаборатории»

Члены комиссии:

Руководитель проектов ООО «Открытые Лаборатории»

Ведущий инженер-программист ООО «Открытые Лаборатории»

А.Г. Севастьянов

А. Г. Ветчинкин

Ф. В. Алейников

Общество с ограниченной ответственностью «Протон»

603163 г. Н.Новгород, Родионова, 203, офис 405
ИНН/КПП 5260456436/ 526001001
ОГРН 1185275039696
р/сч 40702810220450000255 в
НИЖЕГОРОДСКОМ ФИЛИАЛЕ
АО ЮниКредит Банк БИК 042202799
к/ с 30101810500000000799

Утверждаю Директор ООО «Протон»

А.С. Малов

«07» октября 2022 года

AKT

О внедрении результатов диссертационной работы Романовой Анны Александровны на тему «Модели и методы оценки вероятностно-энергетических характеристик информационного взаимодействия в интернете вещей» в проектах

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Романовой Анны Александровны, представленной на соискание ученной степени кандидата технических наук, обладают актуальностью, представляют практический интерес и были внедрены в ООО Протон при разработке корпоративных информационных систем.

Директор ООО «Протон» А.С. Малов

