министерство цифрового развития,  
связи и массовых коммуникаций российской федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

Бушеленков Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕЙ  
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель Доктор технических наук, доцент Парамонов Александр Иванович

Санкт-Петербург - 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[**ВВЕДЕНИЕ 4**](#bookmark1)

[**ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ 11**](#bookmark5)

1. [Развитие телекоммуникационных сетей 11](#bookmark7)
2. Общие положения 11
3. Прогноз развития телекоммуникаций 13
4. Анализ развития сетей доступа 15
5. [Анализ развития Интернета вещей 17](#bookmark12)
6. Понятие Интернета вещей 17
7. Основные принципы Интернета вещей 19
8. [Анализ архитектуры сетей Интернета вещей 21](#bookmark16)
9. Архитектура Интернета Вещей 21
10. Стандарты, используемые в Интернете вещей 36
11. Приложения Интернета вещей 39
12. Практическое применение ИВ 49
13. [Выводы 51](#bookmark22)

[**ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ РЕШЕТОК 53**](#bookmark25)

1. [Анализ особенностей структуры сети высокой плотности 53](#bookmark27)
2. [Модель сети связи на основе решеток 56](#bookmark29)
3. [Теория перколяции и качество функционирования сети 64](#bookmark31)
4. [Сравнительный анализ применения метода перколяции для оценки](#bookmark32)

[связности сети 69](#bookmark34)

1. [Выводы 74](#bookmark35)

[**ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА МАРШРУТОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ 75**](#bookmark38)

1. [Анализ моделей точечных процессов в задачах моделировании сети высокой плотности 75](#bookmark42)
2. Предварительные замечания 75
3. Понятие точечного процесса и его интерпретация в прикладной области 76
4. Параметры и свойства точечных процессов 77
5. Модели точечных процессов 79

з

1. Возможные приложения точечных процессов в моделировании сетей связи 86
2. [Предварительные замечания по задачам выбора маршрута 88](#bookmark49)
3. [Постановка задачи построения маршрута 90](#bookmark50)
4. [Модель и метод выбора узлов для построения маршрута 92](#bookmark53)
5. [Выводы 103](#bookmark55)

[**ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА В СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ 105**](#bookmark58)

1. [Много-путевая маршрутизация 105](#bookmark59)
2. Предварительные замечания 105
3. Беспроводные одноранговые и ячеистые сети 106
4. Достоинства многолучевой маршрутизации 108
5. Элементы протокола многопутевой маршрутизации 109
6. [Протоколы многопутевой маршрутизации 111](#bookmark69)
7. Многопутевая маршрутизация в беспроводных ячеистых сетях 117
8. [Предварительные замечания 120](#bookmark67)
9. Модель много-путевой маршрутизации 121
10. [Метод выбора маршрутов при много-путевой маршрутизации 126](#bookmark71)
11. [Результаты имитационного моделирования 135](#bookmark76)
12. [Выводы 137](#bookmark78)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 138**](#bookmark79)

[**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 140**](#bookmark82)

[**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 141**](#bookmark83)

**ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ 152**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны модели и методы повышения эффективности сети Интернета вещей высокой плотности. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Получены результаты анализа состояния и перспектив развития методов построения сетей Интернета вещей, в том числе, сетей с высокой плотностью. Результаты показали, что в обозримом будущем количество узлов сети Интернета вещей будет возрастать, что требует эффективных методов построения таких сетей и управления ими.
2. Получены результаты анализа возможности применения теории перколяции в задачах моделирования сетей Интернета вещей, которые показали, что теория перколяции может быть успешно использована в задачах построения сетей высокой плотности, в случаях выбора регулярных структур для маршрутизации трафика. Методы теории перколяции в таком случае позволяют получить оценку состояния сети с точностью как минимум втрое превосходящей точность оценки с использованием методов случайных графов.
3. Анализ структур сетей интернета вещей и разработка модели сети на основе моделей решеток показали, что особенности сетей Интернета вещей высокой плотности позволяют создавать регулярные структуры для маршрутизации трафика, которые являются эффективным решением построения логической структуры сети.
4. Анализ методов маршрутизации и разработка метода выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности позволили разработать метод рационального выбора узлов маршрута в сети Интернета вещей высокой плотности, который обеспечивает максимальную скорость передачи и повышение эффективности использования сетевых ресурсов.
5. Разработан метод многопутевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности, который позволяет повысить скорость передачи данных

за счет использования ресурсов нєскольких маршрутов причем группа маршрутов выбирается из соображений получения максимальной эффективности.

Полученные в работе результаты использованы при разработке методики планирования сети Интернета Вещей, а также при учебном процессе СПб ГУТ.

В перспективе результаты работы могут быть использованы при разработке методов построения и управления трафиком перспективных сетей связи