

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение  
высшего образования  
"Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации"

*На правах рукописи*

**Анисимов Дмитрий Владимирович**

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ  
КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА  
IEEE 802.11, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В СОСТАВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ  
СИСТЕМ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Дмитриев Сергей Владимирович

Орел – 2016 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РОЛЬ И МЕСТО БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11 В СТРУКТУРЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11 НА МАС-УРОВНЕ.....	11
1.1 Анализ существующих распределенных систем управления .....	11
1.2 Роль и место беспроводных сегментов в распределенных сетях передачи данных на примере газотранспортного предприятия. Анализ беспроводных технологий наиболее широко используемых в распределенных сетях передачи данных .....	14
1.3 Анализ существующих методов доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 .....	19
1.4 Анализ существующих аналитических методов оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на МАС-уровне .....	30
1.5 Общая постановка задачи диссертационного исследования.....	38
Выводы по главе.....	39
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ СТАНДАРТА IEEE 802.11 С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ЗАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И ВОЗМОЖНОГО ИСКАЖЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАКЕТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ.....	41
2.1 Постановка задачи по разработке математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале.....	41
2.2 Определение модели систем массового обслуживания, описывающей ненасыщенное состояние беспроводного канала связи .....	44
2.3 Марковская модель изменения состояний элементов СПД стандарта IEEE 802.11 в условиях идеального канала и при высокой нагрузке в сети (насыщенное состояние сети) .....	48

2.4 Марковская модель изменения состояний элементов СПД стандарта IEEE 802.11, учитывающая ненасыщенное состояние сети и возможное искажение передаваемых пакетов в результате воздействия помех в радиоканале .....	51
2.5 Оценка производительности беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, функционирующей в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале.....	69
Выводы по главе.....	83
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ.....	84
3.1 Постановка задачи по разработке алгоритма.....	84
3.2 Обоснование критерия, метода и параметров оптимизации. Разработка блок-схемы алгоритма .....	85
3.3 Оценка эффективности применения алгоритма настройки параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 .....	96
Выводы по главе.....	103
ГЛАВА 4. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА IEEE 802.11, УЧИТЫВАЮЩИЙ СОСТОЯНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ СТАБИЛИЗАЦИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ НА МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЙ НАГРУЗКИ .....	105
4.1 Постановка задачи по разработке алгоритма.....	105
4.2 Методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загруженности элементов сети и формирующая решающее правило по допуску в канал нового информационного потока .....	108
4.3 Модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети .....	115

4.4 Исследование основных свойств разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 .....	121
4.5 Научно-технические предложения по практическому использованию разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 .....	127
Выводы по главе.....	133
ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА IEEE 802.11 .....	135
5.1 Обоснование и выбор среды имитационного моделирования. Определение исходных данных и условий моделирования .....	135
5.2 Верификация разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале.....	140
5.3 Оценка эффективности применения разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 .....	145
5.4 Статистический анализ точности моделирования (валидация данных имитационного моделирования) процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 с учетом процедур разработанного алгоритма распределенного доступа .....	152
Выводы по главе.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	162
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	162
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	180

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время беспроводные сетевые технологии заняли прочное место в нашей жизни. Они широко используются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, военной сфере, как самостоятельные системы связи, так и в качестве сегментов различного рода распределенных систем управления. Наиболее широкое распространение получили технологии стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi, Wireless Fidelity). Несмотря на большое разнообразие расширений (протоколов) данного стандарта, канальный уровень этих протоколов един, а, следовательно, от эффективности его функционирования во многом зависит и эффективность функционирования беспроводных сетей в целом. Именно на MAC-уровне устанавливаются правила совместного использования среды передачи данных одновременно несколькими станциями (элементами) беспроводной сети.

Несмотря на достаточно большое время, прошедшее с момента разработки стандарта IEEE 802.11 научный интерес к нему не ослабевает и по настоящее время, что подтверждается большим количеством научных работ, посвященных аналитическому моделированию беспроводных сетей и оценке их производительности в различных условиях. Но, к сожалению, особенности функционирования беспроводных сетей при оценке их производительности до сих пор недостаточно полно учтены. Так, полученные результаты оказываются неприменимыми в условиях "нормальной" нагрузки (ненасыщенное состояние сети), когда буферы станций сети периодически оказываются пустыми, а также в условиях помех и искажений передаваемых пакетов. Кроме того, изменение настраиваемых параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 по-разному влияет на его производительность, что требует наличия алгоритмов их оптимизации, а бистабильность протокола предполагает разработку механизмов предотвращения перегрузок в сети. Таким образом, исследование моделей функционирования сетей стандарта IEEE 802.11, учитывающих произвольный режим нагрузки в сети (насыщенное и ненасыщенное состояние), влияние помех

и получение на их основе конкретных алгоритмов управления параметрами канального уровня, обеспечивающих повышение пропускной способности сети, является весьма актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Вопросам моделирования, оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 и повышению эффективности их функционирования посвящено большое количество научных работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных ученых: В.М. Вишневого, А.И. Ляхова, С.Л. Портного, С.Н. Степанова, М.С. Немировского, Ю.С. Шинакова, О.И. Шелухина, П.П. Бочарова, В.Б. Крейнделина, А.Ю. Савинкова, G. Bianchi, F. Cali, E. Ziouva, K. Szczypiorski, P. Chatzimisios, R. Oliveira, P. Raptis, A. Zanella, Chuan Heng Fox, K. Ghaboosi и др. Среди этих работ большинство посвящено анализу производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 для условий максимальной нагрузки (насыщенное состояние сети) и в предположении идеальности характеристик канала связи (отсутствие шумов, помех и других мешающих радиосигналов в сети), другая часть работ частично учитывает данные факторы, но результаты, как правило, носят локальный по областям и условиям применения характер, обладают определенными достоинствами и недостатками. Анализ этих и других опубликованных результатов показывает актуальное направление исследований по дальнейшему развитию существующих методов моделирования и оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 с целью объединения их достоинств и исключения присущих им недостатков. При этом, разработка и анализ новых моделей и алгоритмов, учитывающих особенности реальных условий функционирования беспроводных сетей, позволит более точно оценивать показатели их производительности, как при проектировании новых, так и при модернизации существующих сетей связи.

**Цель диссертационной работы** состоит в повышении пропускной способности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе распределенных систем при произвольном режиме нагрузки

(ненасыщенное и насыщенное состояние) и наличии помех в радиоканале, за счет управления параметрами канального уровня.

**Задачи диссертационной работы**, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Провести аналитическое моделирование процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне с учетом уровня загруженности ее станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. Разработать комплекс алгоритмов по настройке параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 и управлению доступом к среде передачи данных, обеспечивающих повышение пропускной способности сети и ее стабилизацию на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки.

3. Провести имитационное компьютерное моделирование беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии, с оценкой ее производительности.

**Методы исследования.** Для достижения цели исследования использовались методы теории вероятностей, математической статистики, телетрафика, системного анализа, методы нелинейного целочисленного программирования и имитационного моделирования.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1. В разработке математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующейся на математическом аппарате цепей Маркова и отличающейся от известных учетом состояния загруженности станций сети и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. В разработке алгоритма настройки параметров канального уровня (за счет поиска их оптимальных значений) беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети и отличающегося от известных:

- учетом при оптимизации нескольких параметров протокола (минимальный размер окна конкуренции, количество попыток передачи пакета);

- обеспечением поиска как оптимальных (по критерию максимума пропускной способности сети), так и рациональных (при наличии ограничений на максимальный размер окна конкуренции и относительный прирост пропускной способности сети) значений параметров стандарта, обеспечивающих повышение пропускной способности сети.

3. В разработке модифицированного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки и отличающегося от известных:

- учетом остаточной пропускной способности канала, с дальнейшим формированием решающего правила о допуске в канал нового информационного потока (или отказе в обслуживании);

- учетом требований к качеству обслуживания передаваемого трафика (QoS) по показателю пропускной способности;

- формированием дополнительных этапов повторной передачи для трафика, требовательного к надежности передачи.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в построении и исследовании модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне, позволяющей оценить основные показатели производительности сети с учетом уровня загруженности ее станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

Практическая значимость работы заключается:

- в доведении полученных результатов до реализуемого алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, что позволяет использовать его при разработке программного обеспечения для телекоммуникационного оборудования (точек доступа, сетевых элементов) данного стандарта;



- в реализации теоретических положений, разработанной методики и алгоритма в проектной деятельности ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" (г. Воронеж) и ООО "Специальный технологический центр" (г. Санкт-Петербург). Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами, которые представлены в Приложении;

- в применении разработанной модели и алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 при реализации программного средства управления ресурсами в среде корпоративного портала (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619124).

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Предложенная математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне позволяет оценить основные показатели производительности сети с учетом уровня загруженности ее станций и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех.

2. Разработанный алгоритм настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 обеспечивает повышение пропускной способности сети. В зависимости от условий функционирования сети (трафиковая нагрузка, конфигурация сети, помеховая обстановка) выигрыш (по показателю пропускной способности) от применения алгоритма может достигать до 30% для базового механизма доступа и до 12% для RTS/CTS механизма доступа в сравнении с показателями, полученными для значений параметров канального уровня, рекомендованных стандартом 802.11.

3. Предложенная методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала стандарта IEEE 802.11 позволяет рассчитать его пропускную способность в насыщенном и ненасыщенном состояниях и обеспечивает формирование решающего правила (критерия) по допуску в канал нового информационного потока (с целью исключения перегрузки канала).

4. Разработанный модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, в отличие от известных, учитывает состояние загруженности станций сети и обеспечивает стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки. Алгоритм рекомендуется использовать как при проектировании новых, так и при модернизации (повышении эффективности функционирования) уже существующих систем беспроводного доступа.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Полученные теоретические результаты обоснованы корректным применением методов теории вероятностей, математической статистики, телетрафика, системного анализа и подтверждены численными результатами имитационного компьютерного моделирования. Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации подтверждается апробацией работы, основные результаты которой докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической интернет-конференции "Информационные системы и технологии" (ГУ-УНПК, г. Орёл, 2013); XI Международной научно-практической интернет-конференции "Энерго- и ресурсосбережение XXI век" (ГУ-УНПК, г. Орёл, 2013); VIII Всероссийской межведомственной научной конференции "Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения" (Академия ФСО России, г. Орёл, 2013); V Международной научной конференции "Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости" (ЕГУ, г. Елец, 2014). По теме диссертационного исследования опубликовано 13 печатных работ, из них 9 в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России. Основные результаты по теме диссертации получены автором лично.

#### **Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 144 наименований и двух приложений. Объем диссертации составляет 181 страница текста. Диссертация содержит 50 рисунков, 7 таблиц.

# **ГЛАВА 1. РОЛЬ И МЕСТО БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11 В СТРУКТУРЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11 НА МАСШТАБНОМ УРОВНЕ.**

## **1.1 Анализ существующих распределенных систем управления**

В настоящее время в Российской Федерации идет реализация большого количества федеральных целевых программ, направленных на развитие различных секторов экономики, обеспечение национальной безопасности страны и повышение эффективности использования природных ресурсов. Реализация данных программ требует внедрения современных технологий автоматизированного управления различными распределенными процессами.

В связи с этим в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, в военной сфере назревает необходимость в организации новых надежных и эффективных автоматизированных систем управления (АСУ) распределенными объектами и объединение их в специализированные (технологические) сети. Кроме того существующие в настоящее время АСУ различных распределенных систем характеризуются тенденцией модернизации при условии максимальной неизменности существующей инфраструктуры и минимальных экономических затрат. Одним из наиболее эффективных направлений модернизации АСУ распределенных систем является применение беспроводных технологий связи (развертывание беспроводных сегментов АСУ), позволяющих экономить средства и время, по сравнению с развертыванием проводных сетей. При этом эффективность функционирования таких АСУ во многом будет зависеть от эффективности функционирования их беспроводных сегментов [2].

В общем случае, под системой принято понимать множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которые образуют определенную целостность, единство [3].

Распределённая система (РС) – это система, для которой отношения местоположений элементов (или групп элементов) играют существенную роль с точки зрения функционирования системы, а, следовательно, и с точки зрения анализа и синтеза системы. РС делятся на два основных вида: непрерывные и дискретные [4]. Непрерывные РС характеризуются неограниченным количеством элементов, они обладают свойством, которое можно сформулировать в следующем виде: "В окрестности любого элемента системы может находиться, по крайней мере, еще один элемент". Дискретные РС характеризуются тем, что их элементы четко разделены между собой. Между соседними элементами системы существует бинарное отношение, которое может быть разрушено каким-либо третьим элементом, в случае его появления. Наиболее распространённым видом РС являются дискретные. Примерами таких распределенных систем являются:

- *Газо(нефти) – транспортные сети.* Такие сети состоят из узлов, в виде добывающих буровых вышек, хранилищ, распределительных и компрессорных станций, перерабатывающих комбинатов, а так же конечных потребителей. Все элементы сети территориально разделены между собой. Трубопроводы являются связующими звеньями, которые соединяют между собой элементы РС. В ходе эксплуатации газо(нефти) – транспортной системы решается многофакторная задача оценки состояний во всех сегментах сети с целью обеспечения её нормального функционирования, контроля и оценки переданного объема газа (нефти) и распределения потоков в направлении потребителей. Решение данных задач распределено по объектам системы. Однако эти отдельные задачи являются составляющими элементами задачи более высокого порядка – управления газо(нефти) – транспортной системой.

- *Электрические сети.* Они состоят из генерирующих мощностей (АЭС, ГЭС, теплостанций), распределительных и трансформаторных объектов, конечных потребителей, а так же линий электропередач различного напряжения, соединяющих данные территориально разнесенные объекты системы. Для функционирования данной системы необходимо контролировать большое количество параметров (напряжение, сила тока, частота, падение напряжения на

интервале и т.п.) в различных точках сети. Устройства контроля и управления этими параметрами распределены по системе. Они служат для сбора технологической информации и осуществления локального управления. Однако общее управление РС осуществляется централизованно.

- *Сети передачи данных (СПД)*. Состоят из большого количества территориально распределенных узлов, которые являются коммуникационным оборудованием или конечными пользователями. Между собой они связаны различными каналами связи: кабельными, оптоволоконными, беспроводными, спутниковыми, каждый из которых имеет отличающиеся процедуры обслуживания. Узлы в сети имеют различное назначение и соответственно скорость обработки информации, объем передаваемого или получаемого трафика. Каналы передачи данных характеризуются пропускной способностью, помехоустойчивостью, протяженностью и другими параметрами. Основной задачей в сетях передачи данных является маршрутизация, которая зависит от большого количества факторов и является частью задачи управления сетью.

- *Логистические системы*. Состоят из транспортных средств (воздушных, водных, наземных), территориально разнесенной инфраструктуры обработки и хранения перевозимых грузов (сортировочные, терминалы, склады, порты, аэродромы), а так же путей доставки (железные и автомобильные дороги, морские и речные пути, воздушные трассы). В ходе доставки груза, логистический маршрут строится через элементы системы, на которых осуществляется погрузка, сортировка, перегрузка и разгрузка. При этом, каждый элемент системы может быть описан набором параметров – средней скоростью передвижения, грузоподъемностью транспорта, объемом и массой перевозимого груза и др. Так же возникает задача оптимизации доставки грузов, в ходе которой надо минимизировать затраты на перевозку при соблюдении сроков поставки. Данная задача является классической для РС и позволяет решить задачу более высокого порядка – управления всей логистической системой.

- *Банковская система*. Состоит из большого количества банков и их филиалов по всему миру. Помимо того, что сами банки и филиалы распределены

территориально, им приходится осуществлять операции между находящимися на расстоянии друг от друга клиентами, другими банками и финансовыми структурами. Каждому банку необходимо решать задачи по обеспечению операционной деятельности с помощью системы межбанковских договоров и программно-аппаратных средств, поддерживающих требования этой системы. Решение этих распределенных задач банками обеспечивают функционирование банковской системы в целом.

Рассмотренные примеры распределенных систем показывают, что все они имеют сходство в том, что обеспечивают децентрализованное решение отдельных задач, от решения которых зависит выполнение общей задачи – управления системой в целом.

## **1.2 Роль и место беспроводных сегментов в распределенных сетях передачи данных на примере газотранспортного предприятия. Анализ беспроводных технологий наиболее широко используемых в распределенных сетях передачи данных.**

Практически любое современное предприятие не обходится без информационной подсистемы, базирующейся на сети передачи данных, позволяющей вести информационный обмен как внутри самого предприятия, так и взаимодействовать с государственными структурами, представителями бизнес сообщества, банками и конечными потребителями. Такие сети являются распределенными. Они характеризуются большим количеством используемых сервисов и служб, работа которых обеспечивается за счёт высокоскоростного доступа пользователей и конечного оборудования к вычислительным и информационным ресурсам, как самого предприятия, так и внешним удаленным распределенным ресурсам. К таким сетям предъявляются требования: мобильности, масштабируемости, необходимости быстрой реконфигурации в процессе функционирования, приемлемым уровнем безопасности, снижением издержек на сетевую составляющую и применяемое сетевое оборудование [5-7].

В большинстве случаев расширение сетей передачи данных за счет наращивания кабельных и оптоволоконных линий является экономически невыгодно. Так же требование быстрого динамического изменения конфигурации часто становится фактором предопределяющим выбор использования беспроводных сетей [8].

Наиболее представительной с точки зрения рассмотрения применения беспроводных СПД в своем составе, является распределенная информационная система газотранспортного предприятия (ГТП). Беспроводные сегменты СПД находят своё место в составе сетевой составляющей ГТП на всех уровнях управления. Примером может быть их применение в качестве конечных локальных сетевых сегментов при построении автоматизированных систем управления производственно-хозяйственной деятельности, при котором они используются для организации информационного взаимодействия в пределах отдельных подразделений, территориально расположенных в одном месте. Так же их использование можно отметить и на уровне оперативного управления в качестве систем резервирования при построении диспетчерской службы. Основное же применение беспроводные сегменты СПД ГТП нашли на уровне управления и контроля технологическими процессами в качестве среды сбора данных от конечного оборудования и передачи их на более высокие уровни иерархии для последующей обработки и формирования управляющих воздействий [9, 10].

Областями применения беспроводных технологий передачи данных для управления и контроля технологическими процессами, характерными при использовании в ГТП являются: буровые платформы, газовозы, заводы по производству сжиженного природного газа, газокompрессорные станции, газовые хранилища, газоизмерительные станции, системы сигнализации и охраны [11]. На всех перечисленных выше объектах ГТП беспроводные сегменты могут использоваться в качестве основной составляющей СПД, а так же могут выступать в качестве резервного её элемента. Основные области применения беспроводных сегментов СПД в ГТП представлены на рисунке 1.1. Применение беспроводных сегментов в составе СПД ГТП обусловлено повышенной

надежностью функционирования беспроводного оборудования в экстремальных условиях эксплуатации. Это связано с особенностью производственной деятельности, осуществляемой в условиях существующего высокого уровня взрывоопасности, экстремальных температур, вибрации, повышенной влажности, пыли и грязи. Использование проводных сетей в таких условиях теряет свою актуальность в связи с высокой стоимостью их реализации, отсутствием возможности быстрого изменения пространственной конфигурации сети [12].



Рисунок 1.1 – Области применения беспроводных сегментов СПД в ГТП

В качестве примера реализации беспроводного сегмента, в рамках ГТП, можно рассмотреть реализацию информационного взаимодействия на газораспределительной станции (ГРС), изображённую на рисунке 1.2. В качестве беспроводного сегмента АСУ ГТП, функционирующего непосредственно на ГРС, представлена сеть стандарта IEEE 802.11 a/b/g, с помощью которой происходит первичный сбор данных от беспроводных датчиков и другого беспроводного оборудования.

Все приведённые выше реализации используют беспроводный сегмент для сбора данных или доведения управляющего воздействия до конечных устройств на уровне АСУ технологического процесса. Данные полученные от конечных



устройств передаются на вышестоящие уровни управления ГТП с помощью проводных, оптических и спутниковых СПД [13, 14].

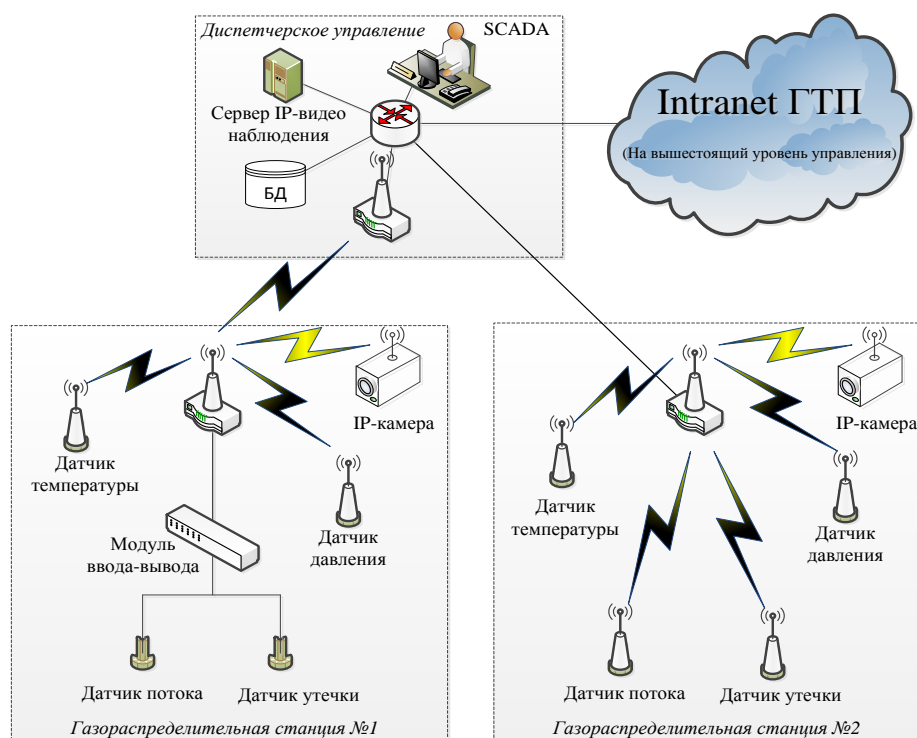


Рисунок 1.2 – Инфраструктура сегмента беспроводной сети ГРС

Проведенный анализ показал, что в существующих распределенных системах используются различные технологии при организации беспроводных сетей. В таблице 1.1 представлены характеристики основных стандартов беспроводных сетей передачи данных, используемых (планируемых к использованию) в РС. В приложении А приведена краткая характеристика рассмотренных стандартов беспроводных СПД [15-23].

Также проведенный анализ беспроводных технологий, используемых в РС, показал, что наибольшее распространение получил стандарт 802.11. Так например, в газо(нефти) – транспортных системах широко используются беспроводные сети стандарта 802.11b, которые к настоящему времени уже не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним современным требованиям по пропускной способности и надежности передачи информации. В связи с этим в таких системах назрела актуальность модернизации беспроводных сетей.

Однако, особенности технологических процессов (консервативность, непрерывность и т.д.) и масштабность развернутых беспроводных сетей стандарта 802.11b в существующих ГТП (до нескольких сотен беспроводных элементов в рамках одного ГТП), не позволяют провести единовременную модернизацию данных сетей с минимальным вмешательством в существующую инфраструктуру и минимальными экономическими издержками. Очевидно, что решение данной задачи может быть связано с поиском оптимальных решений по повышению производительности уже существующих беспроводных сетей, функционирующих в составе РС, не прибегая к варианту кардинальной замены существующего оборудования на новые, более производительные модели. В связи с этим возникает интерес к повышению производительности и надежности функционирования данного стандарта.

Таблица 1.1 – Характеристики основных стандартов беспроводных СПД

Стандарт	Применение	Пропускная способность	Радиус действия	Частоты	Модуляция	Технологии защиты данных	Метод доступа (MAC-уровень)
<b>802.11a</b>	WLAN	до 54 Мбит/с	до 100 м	5,0 ГГц	OFDM	WEP, WPA, WPA2, VPN	Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий – CSMA/CA (Distributed Coordination Function - DCF, Point Coordination Function - PCF)
<b>802.11b</b>	WLAN	до 11 Мбит/с	до 100 м	2,4 ГГц	DSSS		
<b>802.11g</b>	WLAN	до 54 Мбит/с	до 100 м	2,4 ГГц	DSSS, OFDM		
<b>802.11n</b>	WLAN	до 450 Мбит/с (теоретически до 600 Мбит/с)	до 100 м	2,4–2,5 или 5,0 ГГц	OFDM		
<b>802.11ac</b>	WLAN	до 433 Мбит/с (80 MHz) (теоретически до 1,3 Гбит/с (80 MHz))	до 100 м	5,0 ГГц	OFDM		
802.15.1	WPAN	до 1 Мбит/с	класс 3 – до 10 м класс 1 – до 100 м	2,4 ГГц	FHSS	PAIRING	
802.15.4	WPAN	250 Кбит/с	10–100 м	2,4 ГГц	OFDM, QPSK	ACL	
802.16d	WMAN	до 75 Мбит/с	6–10 км	1,5–11 ГГц	OFDM-256	PKM, DES, 3DES	
802.16e	Mobile WMAN	до 40 Мбит/с	1–5 км	2,3–13,6 ГГц	SOFDMA	PKM, AES	CSMA/CA (Enhanced DCF – EDCF, Hybrid Coordination Function - HCF)

В настоящее время наименее освещенной в научной литературе является задача повышения характеристик стандарта IEEE 802.11 за счет усовершенствования его работы на канальном уровне. Не смотря на большое разнообразие расширений данного стандарта, канальный уровень (уровень доступа к среде передачи – MAC-уровень) у них един, а, следовательно, от эффективности его функционирования во многом зависит и эффективность функционирования беспроводных сетей IEEE 802.11 в целом [24, 25]. Далее будут рассмотрены основные существующие методы доступа к среде передачи данных стандарта 802.11.

### **1.3 Анализ существующих методов доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11**

Метод доступа – это механизм взаимодействия элементов сети со средой передачи данных, определяющий правила получения права передачи данных по используемому каналу. Каждый метод доступа определяется набором правил (алгоритмом), используемым сетевым оборудованием, чтобы направлять поток сообщений через сеть [26, 27]. Управление доступом и обмен данными представляет собой набор стратегий и механизмов, позволяющих сети эффективно удовлетворять широкий спектр запросов на обслуживание [28]. В общем случае контроль управления доступом представляет собой некоторую оценку, которую производит сеть перед тем, как принять предлагаемое новое соединение. Это процесс принятия решения о том, какой ресурс (частотный, временной, пространственный, кодовый) можно выделить для нового вызова (пакета), поступившего в сеть [29]. Важным аспектом управления доступом и обменом данными является то, насколько эффективно применяемые методы реагируют на перегрузку в сети. Под перегрузкой в данном случае понимается такое положение, когда ухудшаются эксплуатационные характеристики сети из-за достижения состояния насыщения таких сетевых ресурсов, как общая полоса пропускания каналов передачи данных и буферов сетевого оборудования [30].

В результате этого в сети возникают длительные задержки при обмене данными или возможна перегрузка сети с блокировкой её работы на неопределенный период времени. Контроль возникновения перегрузки в сети является одной из основных задач управления обменом данными [31].

Таким образом, управление доступом к среде передачи данных определяется как политика, в соответствии с которой на поступающие в сеть потоки могут накладываться некоторые ограничения. При этом эффективным управление доступом может считаться тогда, когда задача по ограничению количества потоков, поступающих в сетевой сегмент, решается таким образом, что бы каждый из этих потоков мог получить определенное качество обслуживания [32].

В настоящее время существует большое количество методов управления доступом к среде передачи, основные из которых представлены на рисунке 1.3 [33-35].

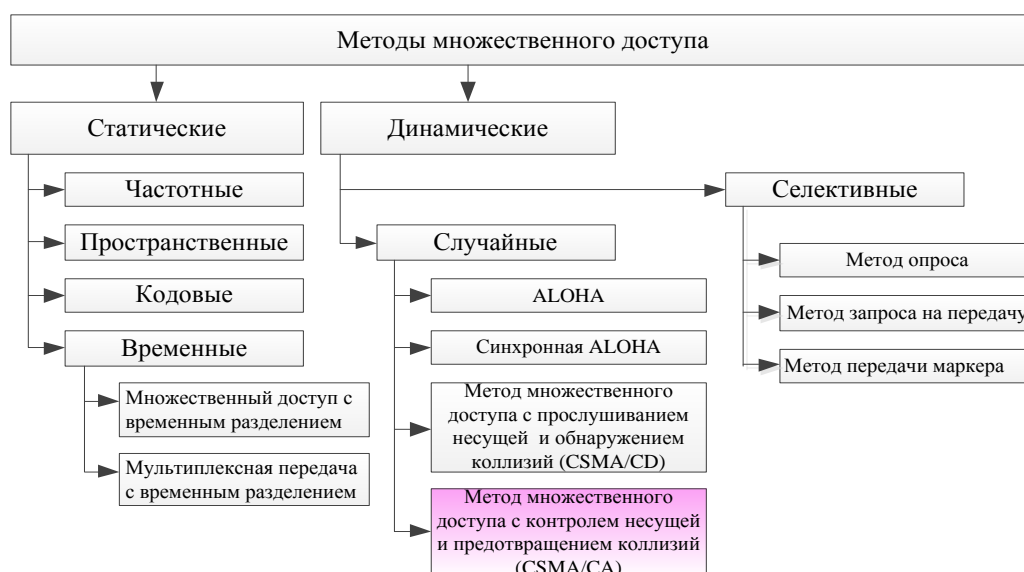


Рисунок 1.3 – Виды методов доступа к среде передачи данных

Основным методом доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 является метод множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (Carrier Sense Multiple Access with collision avoidance, CSMA/CA). Данный метод предполагает, что каждая станция перед передачей

данных в сеть сигнализирует о своем намерении, поэтому остальные станции "узнают" о готовящейся передаче и могут избежать коллизий.

В общем случае стандарты семейства IEEE 802.xx используют два нижних уровня модели OSI – канальный и физический (рисунок 1.4). Более высокие уровни по своей структуре не различаются, как для беспроводных, так и для проводных локальных сетей. У сетей стандарта IEEE 802.11 производится разделение канального уровня на два подуровня: уровень логической передачи данных (Logical Link Control, LLC) и уровень управления доступом к среде передачи (Media Access Control, MAC), который обеспечивает корректное совместное использование общей среды передачи данных. После получения доступа к среде ею может пользоваться более высокий уровень – LLC, который реализует функции интерфейса с прилегающим к нему сетевым уровнем. Протоколы уровней MAC и LLC взаимно независимы. Поэтому каждый протокол уровня MAC может применяться с любым протоколом уровня LLC, и наоборот [36].

Для построения беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 могут быть использованы различные реализации физического уровня протокола (PHY-уровень). На данном уровне определяются механизмы, которые используются для преобразования данных и обеспечения требуемой скорости передачи в зависимости от среды передачи. Таким образом, физический уровень определяет методы кодирования/декодирования и модуляции/демодуляции сигнала при его передаче и приеме. Широкий выбор практических реализаций физического уровня обусловлен наличием ряда физических сред, применяемых для передачи кадра и нескольких различных радиочастотных диапазонов. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются спецификации FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). В то время как различия между вариантами реализации физического уровня имеют огромное значение (и очень заметны конечному пользователю, поскольку они непосредственно связаны с характеристиками производительности беспроводной сети), протокол

MAC-подуровня является общим элементом всех локальных сетей стандарта IEEE 802.11, то есть все варианты физического уровня работают с одним и тем же алгоритмом подуровня MAC.

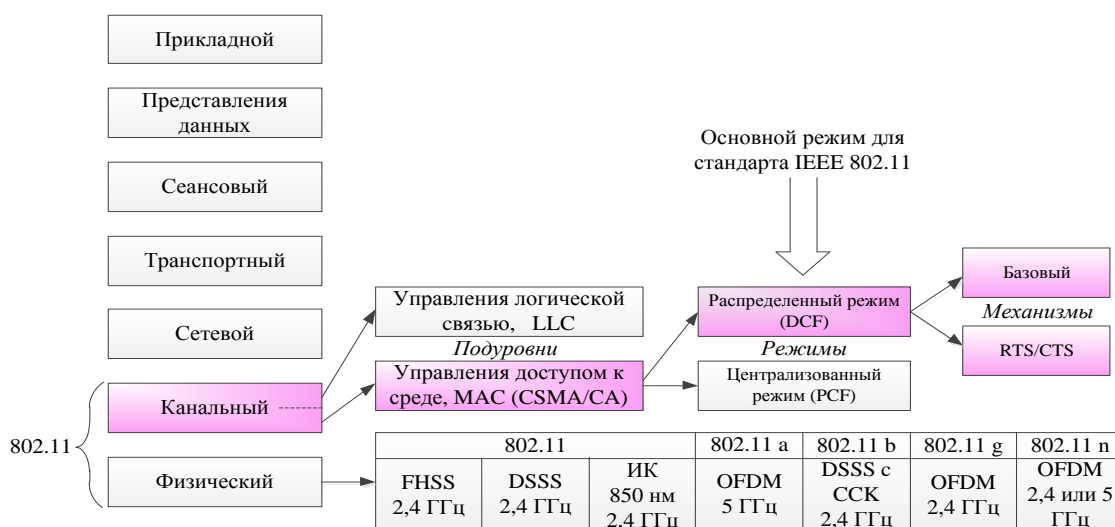


Рисунок 1.4 – Место протокола 802.11 в модели OSI

Известно, что основой проводной спецификации IEEE 802 является множественный доступ к каналу с контролем несущей и обнаружением коллизий (CSMA/CD), который предполагает начало передачи только при свободном канале. В случае обнаружения элементами сети попытки одновременной передачи на одном канале, они прекращают передачу и возобновляют её через случайный промежуток времени. Поэтому при передаче каждый элемент сети должен контролировать канал. Однако, простота реализации процесса взаимодействия между элементами сети в проводном канале не характерна для беспроводного, так как затухание сигнала в нём существенно выше. Это создает предпосылки для возникновения в беспроводных сетях следующих проблем:

- сложность задачи контроля несущей передающим устройством (собственный сигнал элемента сети при передаче данных намного мощнее, чем сигнал удаленного устройства);
- не возможность прямого обнаружения станциями коллизий во время передачи, в следствии использования полудуплексных приёмопередатчиков;

- возможность появления "скрытых" элементов сети (когда два устройства удалены и "не слышат" друг друга, однако оба попадают в зону охвата третьего устройства). Если оба первых устройства начнут передачу, то они принципиально не смогут обнаружить конфликтную ситуацию и определить, почему переданные ими пакеты не приняты.

Для решения данных проблем в стандарте IEEE 802.11 на канальном уровне определены следующие два основных механизма доступа:

**1. С распределённой функцией координации (Distributed Coordination Function, DCF)**, основывающейся на множественном доступе с контролем несущей с предотвращением коллизий (CSMA/CA) и схеме двоичной экспоненциальной задержки (Binary Exponential Backoff, BEB) для снижения вероятности одновременной передачи несколькими станциями сети [36]. Данный механизм доступа является наиболее часто используемым при функционировании беспроводных сетей.

**2. С дополнительной точкой функции координации (Point Coordination Function, PCF)** – с предварительной установкой соединения, представляющий собой способ централизованного управления передачей и применяемый при обмене данными, критичными к задержкам. Данный режим реализует синхронную передачу в асинхронной сети, путем резервирования определенных временных интервалов. Он позволяет использовать технологию IEEE 802.11 для таких сервисов, которым необходимо обеспечить передачу данных в синхронном режиме (видео, голос). В случае задействования механизма PCF один из узлов сети (точка доступа) является центральным и называется центром координации (Point Coordinator, PC). На центр координации возлагается задача управления коллективным доступом всех остальных узлов сети к среде передачи данных на основе определенного алгоритма опроса или исходя из приоритетов узлов сети. Важно, что такой подход полностью исключает конкурирующий доступ к среде, как в случае механизма DCF и делает невозможным возникновение коллизий. При этом функция централизованной координации (PCF) может использоваться совместно с функцией распределенной координации (DCF), дополняя ее.

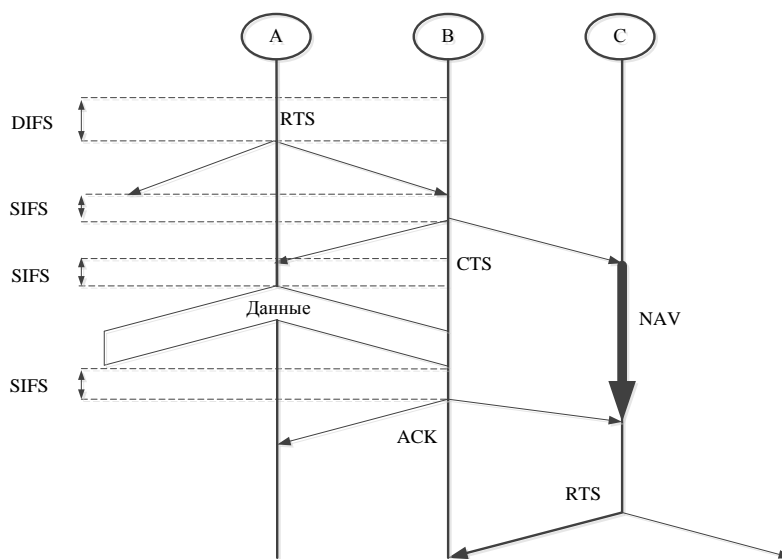
Так как механизм DCF является наиболее распространенным, то рассмотрим его более подробно. В режиме DCF информационные пакеты передаются в общем случае двумя способами. Короткие пакеты, чья длина не превышает некоторого предела  $\overline{L}_p$ , передаются с помощью базового механизма доступа. При этом станция, успешно принявшая кадр, содержащий информационный пакет, спустя короткий интервал SIFS немедленно отвечает положительным подтверждением АСК. Явная передача АСК необходима, поскольку в беспроводной среде передатчик не может определить, успешно ли получен его пакет или нет, основываясь лишь на прослушивании канала (контроля несущей) [37]. В случае если длина пакета превышает порог  $\overline{L}_p$ , передача информационного кадра предваряется запросом на передачу – кадром RTS ("запрос на передачу"), направляемым к принимающей станции, которая, спустя интервал SIFS, отвечает разрешающим кадром CTS ("подтверждение готовности к приему"). Далее в соответствии с описанной выше процедурой, передающее устройство отправляет кадр с данными и дожидается подтверждения АСК [29, 36]. Данный способ передачи пакетов носит название RTS/CTS и схематично изображен на рисунке 1.5 (а). При этом посылка кадра CTS является командой для всех остальных элементов сети на прекращение обращений к каналу в течении определенного интервала времени, указанного в соответствующем поле кадра CTS. На основании этой информации станции не участвующие в передаче формируют задержку на требуемое время, используя параметры вектора распределения ресурсов NAV (Network Allocation Vector). На рисунке 1.5 (б) представлен пример принципа квитирования (механизм RTS/CTS) и формирования вектора NAV. Следует отметить, что коллизия в режиме RTS/CTS может произойти только с RTS кадром и обнаруживается отсутствием CTS кадра (кадра подтверждения). Значение размера пакета  $\overline{L}_p$  выбирается в результате разумного компромисса между накладными расходами механизма RTS/CTS, заключающимися в передаче двух дополнительных кадров RTS и CTS, и выигрышем в длительности коллизии. Отметим, что длительность возникающих



коллизии определяется максимальной длиной информационных кадров, участвующий в коллизии, а при использовании механизма RTS/CTS она равна длительности передачи короткого кадра RTS.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Схема передачи данных с помощью механизма RTS/CTS (а) и принцип формирования вектора NAV (б)

Режим доступа DCF требует синхронизации станций. В спецификации IEEE 802.11 эта проблема решается достаточно просто – временные интервалы начинают отсчитываться от момента окончания передачи очередного кадра. Это не требует передачи каких-либо специальных синхронизирующих сигналов. Стандарт IEEE 802.11 подразумевает выход на передачу только в начале каждого временного слота, а размер слота выбирается таким образом, чтобы обеспечить обнаружение передачи пакета любой другой станцией сети [36, 29].

Каждая станция, перед началом передачи нового пакета, обязана предварительно прослушать среду. Стандарт IEEE 802.11 предусматривает два

механизма контроля за активностью в канале (обнаружения несущей) – это физический и виртуальный контроль. Физический контроль осуществляется на соответствующем РНУ-уровне и заключается в определении значения уровня сигнала в антенне и сравнении его с некоторым пороговым значением. Механизм виртуального контроля несущей заключается в том, что в передаваемых кадрах данных, а также в управляющих кадрах ACK и RTS/CTS содержится информация о времени, которое требуется для передачи пакета и получения подтверждения от корреспондирующей станции об успешном его приеме. В момент передачи одним из элементов сети все остальные элементы получают информацию о текущей передаче и могут самостоятельно определить, на какой временной интервал канал будет занят, то есть передающий элемент сети всем сообщает на какое время он резервирует канал [38-40]. При это в качестве условия доступа к среде MAC-уровень проверяет значение своего вектора распределения сети NAV, который представляет собой размещенный на каждой станции счетчик, значение которого соответствует времени, необходимому для передачи предыдущего кадра. Значение NAV должно быть равно нулю, чтобы станция могла попытаться отправить кадр. Прежде чем послать кадр, станция вычисляет необходимое для его передачи время на основе объема кадра и скорости передачи данных в сети. Станция помещает значение, соответствующее названному времени, в поле продолжительности (duration field) заголовка кадра. Когда станция получает кадр, она проверяет значение в его поле продолжительности и использует его в качестве основы для установки своих счетчиков NAV. Благодаря этому процессу среда резервируется для использования передающей станцией. Обобщенный алгоритм функционирования механизма DCF представлен на рисунке 1.6. Если по результатам наблюдения за каналом станцией принято решение, что канал свободен, в течение времени большего или равного промежутку DIFS, то она начинает передачу. Иначе, если считается, что канал занят (или становится занятым в течении DIFS), станция продолжает контролировать канал до тех пор, пока он не станет свободным на длительность DIFS. В этот момент станция выбирает для передачи слот на основании разыгранной, с использованием

усеченного экспоненциального двоичного алгоритма отсрочки, случайной задержки (backoff). Эта особенность протокола CSMA/CA позволяет минимизировать вероятность столкновения с пакетами, передаваемыми другими станциями. Номер слота выбирается как случайное целое число, равномерно распределенное в интервале  $[0, W-1]$ , где  $W$  – длительность окна конкуренции (Contention Window). Оно зависит от числа безуспешных передач пакета. При первой попытке передачи  $W = W_0$ , где  $W_0$  – длительность минимально возможного окна конкуренции. После каждой безуспешной попытки передачи  $W$  удваивается до достижения максимально возможного значения  $W_{max} = 2^m W_0$ . В любой момент времени размер окна конкуренции равен  $W_i = 2^i W_0$ , где  $i \in [0, m]$  – уровень (состояние) счетчика отсрочки (рисунок 1.7). Таким образом, станция может находиться в одном из  $m+1$  состояний, где номер состояния  $i$  равен текущему числу попыток передачи. Если устройство повторно передает пакет, то для определения занятости канала оно должно использовать увеличенный межкадровый интервал SIFS [38, 1].

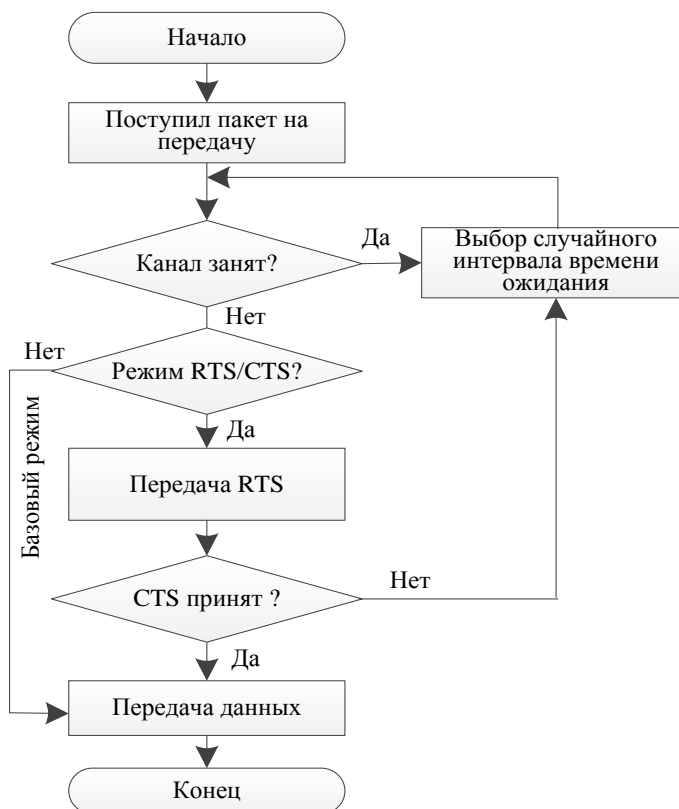


Рисунок 1.6 – Обобщенный алгоритм функционирования механизма DCF

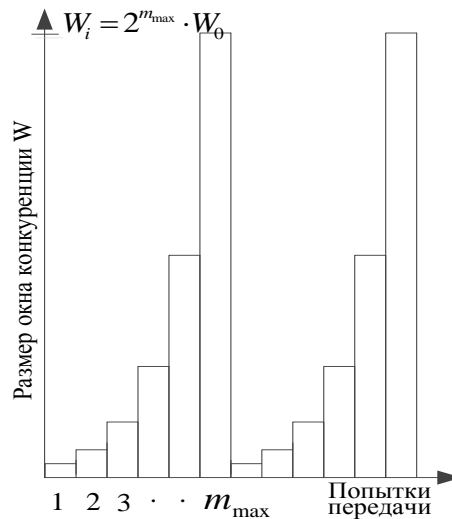


Рисунок 1.7 – Графическая интерпретация механизма изменения размера окна конкуренции

Длительность случайного интервала отсрочки загружается в специальный счетчик ВС (backoff counter). Его значение уменьшается на единицу, при прохождении каждого пустого слота длительностью  $\sigma$  пока канал свободен. Как только счетчик обнулится, устройство может занимать канал. Если до обнуления счетчика канал занимает другое устройство, счет останавливается, сохраняя достигнутое значение (счетчик "замораживается"). При следующей попытке отсчет начинается с сохраненной величины. В результате станция, не успевшая передать кадр в предыдущий раз, получает больше шансов занять канал в следующий раз.

На рисунке 1.8 приведена схема базового механизма доступа. Две станции А и Б используют общий беспроводной канал. В начальный момент счетчик ВС станции А равен 7, а станции Б – 16. Станция А первой выходит на передачу и успешно передает пакет данных. Передача происходит в середине временного слота, который соответствует значению backoff станции Б = 9. Станция Б регистрирует занятость канала и блокирует обратный отсчет до момента, когда канал окажется свободным более чем на DIFS. Если станция А при передаче следующего пакета выберет задержку равной 9, т.е. содержимое ВС счетчиков А и Б окажется одинаковым, то произойдет коллизия.

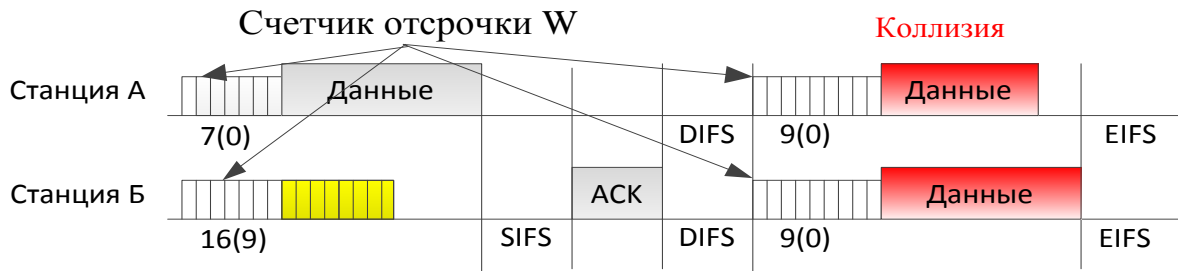


Рисунок 1.8 – Пример базового механизма доступа

Отметим, что помимо основных свойств доступа протокола CSMA/CA и механизма квитирования, MAC-уровень использует различные методы и параметры, основанные на задержках. Например, для управления приоритетами доступа и бесколлизийной передачи в протоколе используются параметры межциклового, межкадрового интервала IFS и вектора NAV. Применяя данные NAV и вектора распределения свободных каналов CCA (Clear Channel Assignment) для индикации затраченного времени и периодов отсрочки, уровень MAC использует три вида интервалов IFS (некоторые из них уже были рассмотрены ранее) [1]:

- короткий межцикловый интервал SIFS;
- межцикловый интервал функции координации DCF – DIFS;
- межцикловый интервал функции с дополнительной точкой координации – PIFS.

На рисунке 1.9 представлена графическая интерпретация описанных временных интервалов.

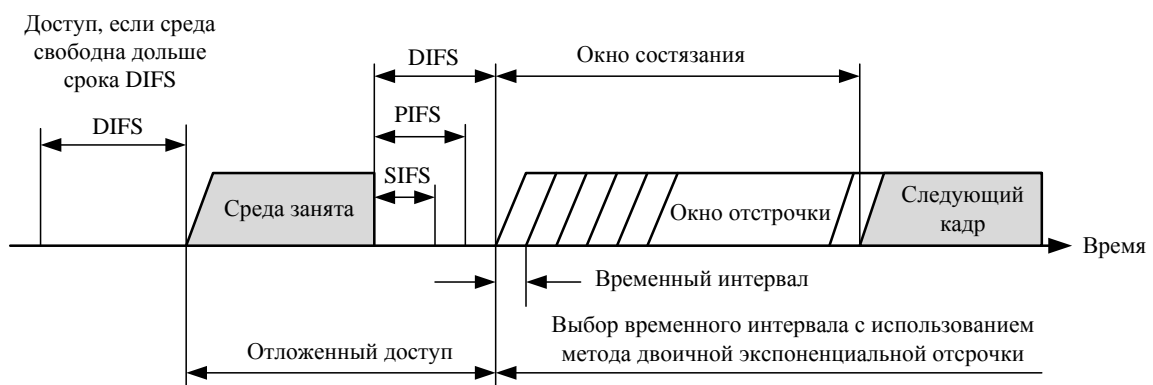


Рисунок 1.9 – Три вида интервалов IFS, используемых на MAC-уровне для индикации затраченного времени и периодов отсрочки

При этом MAC-уровень поддерживает три типа циклов: обслуживания, управления и данных. Циклы обслуживания используются для поддержки связи и взаимодействия станций с точкой доступа, тактовой и цикловой, пакетной синхронизации, а также для идентификации станций. Циклы управления используются для квитирования готовности методом RTS/CTS, положительного уведомления АСК и чередования в режиме множественных одновременных запросов (CP (Connection Period – период соединения) и CFP (Connection Free Period – период, свободный от соединения)). Циклы данных могут использоваться в режимах CP и CFP, а в режиме CFP могут также быть объединены с системой опроса и уведомления АСК [1].

Таким образом, проведенный анализ существующих методов доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 позволяет сделать вывод об алгоритмической сложности применяемых для доступа к среде механизмов, связанной со случайностью процесса выбора каждой станцией числа ожидаемых до момента передачи тайм-слотов, не возможностью прямого обнаружения станциями коллизий во время передачи, в связи с полудуплексным режимом работы, а также с возможностью появления "скрытых" станций в сети.

#### **1.4 Анализ существующих аналитических методов оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне**

Эффективность функционирования беспроводной системы передачи данных в общем случае определяется продуктивностью использования ресурсов системы в достижении главной цели ее функционирования. При этом продуктивность использования ресурсов определяет производительность данной системы. Под производительностью, в свою очередь, принято понимать показатель, характеризующий число требований, обслуженных в единицу времени при заданных параметрах нагрузки. Показатель производительности в общем случае характеризует эффективность использования выделенного для сети

ресурса (частотного, временного, пространственного). Следует отметить, что в качестве основного показателя производительности беспроводной сети, как правило, используется ее эффективная пропускная способность.

Оценка производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 и разработка новых научно-технических решений по ее повышению являются важным и актуальным направлением в области системного анализа эффективности функционирования беспроводных СПД. Несмотря на достаточно большое время, прошедшее с момента разработки стандарта IEEE 802.11, научный интерес к нему не ослабевает, что подтверждается большим количеством научных работ (рисунок 1.10), посвященных аналитическому моделированию беспроводных сетей и оценке их производительности в различных условиях.

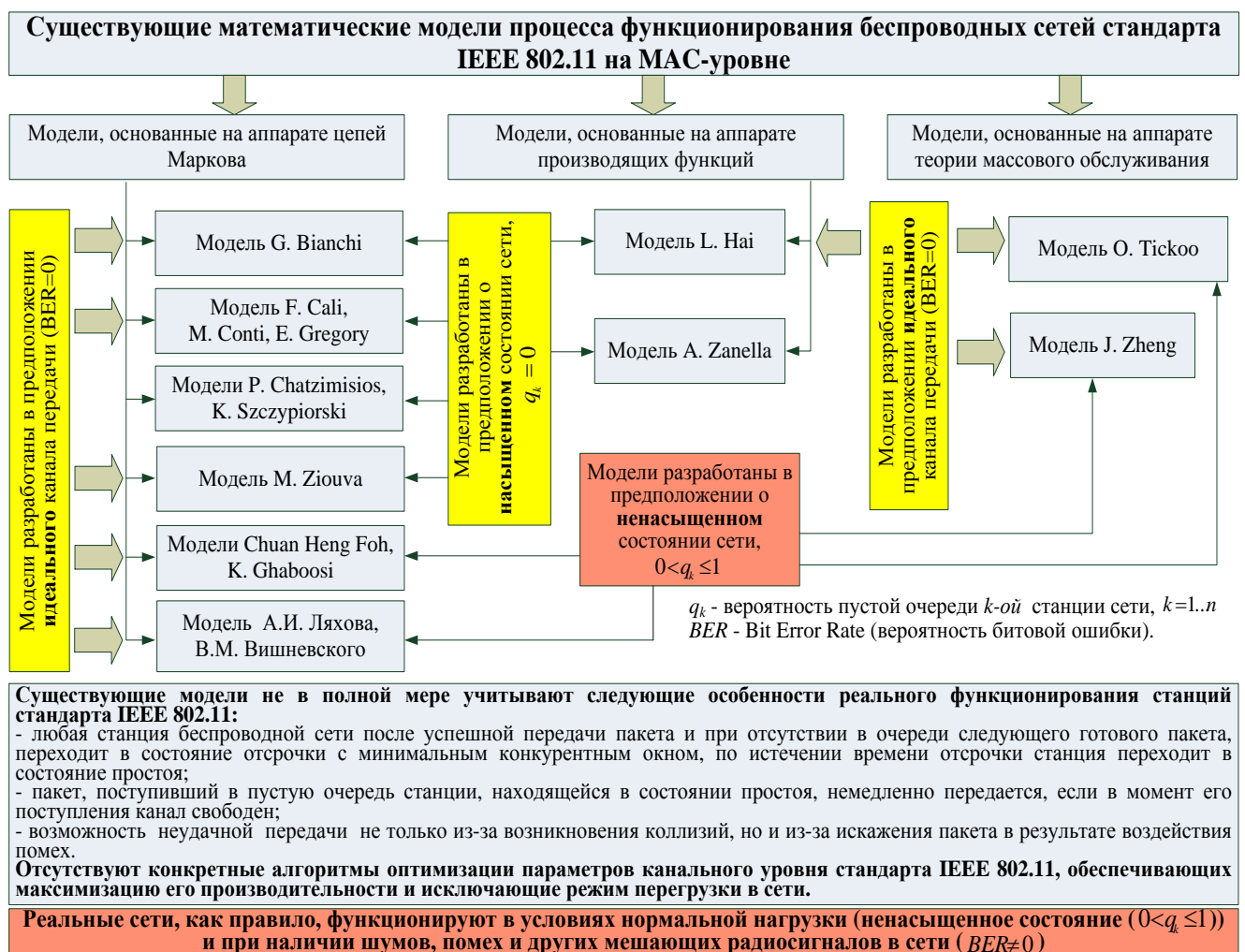


Рисунок 1.10 – Базовые аналитические модели канального уровня стандарта IEEE 802.11

Среди наиболее известных следует отметить работы российских и зарубежных ученых: В.М. Вишневого, А.И. Ляхова, С.Л. Портного, С.Н. Степанова, М.С. Немировского, Ю.С. Шинакова, О.И. Шелухина, П.П. Бочарова, В.Б. Крейнделина, А.Ю. Савинкова, G. Bianchi, F. Cali, E. Ziouva, K. Szczypiorski, P. Chatzimisios, R. Oliveira, P. Raptis, A. Zanella, Chuan Heng Fox, K. Ghaboosi и др. В этих работах, используются различные подходы для оценки пропускной способности, времени задержки передачи пакетов и других показателей работоспособности беспроводных сетей. Проведенный анализ существующих научных работ, посвященных аналитическому моделированию сетей стандарта IEEE 802.11, позволил выделить и структурировать следующие модели процесса их функционирования на MAC-уровне (рисунок 1.10):

- модели, основанные на аппарате цепей Маркова;
- модели, основанные на аппарате производящих функций;
- модели, основанные на аппарате теории массового обслуживания.

Модели, основанные на аппарате цепей Маркова, подробно описаны в работах [41-51]. Работы [41, 42], описывающие механизм доступа к каналу стандарта IEEE 802.11 в базовом и RTS/CTS режимах, являясь своего рода "пионерскими" работами в данной области, позволили сформировать начальную методическую базу для оценки характеристик производительности таких сетей. Предложенная G. Bianchi в [41] аналитическая модель стала базовой для дальнейших исследований и позволила получить оценочные значения пропускной способности сетей стандарта IEEE 802.11. Однако данная модель была разработана при ряде ограничений, а именно: количество попыток передачи одного пакета не ограничено, сеть находится в насыщенном состоянии, характеристики канала радиосвязи идеальны и отсутствует возможность появления скрытых узлов в сети. Очевидно, что большинство ограничений, при которых была получена модель G. Bianchi, на практике не выполняется. Далее данная модель была уточнена в работе [42], в которой была использована дискретная целочисленная временная шкала, описывающая работу сети стандарта IEEE 802.11 с помощью виртуальных слотов. Виртуальный слот описывает одно



из возможных состояний, в котором может находиться станция сети в начале каждого временного слота: успешный слот – в случае удачной передачи одной из станций; коллизийный слот – в случае одновременной передачи двух и более станций; пустой слот – в случае, если не одна из станций не ведет передачу. Ключевым допущением при разработке данной модели является предположение о постоянстве вероятности коллизий, в независимости от количества совершенных попыток передачи одного и того же пакета. Также в работе [42] для стандарта IEEE 802.11 b было исследовано поведение времени задержки при передаче пакетов в канале, что являлось логическим продолжением, проведенного в [41] анализа пропускной способности сети. Результатом стало определение зависимости среднего времени задержки передачи пакета от размера передаваемого пакета и числа элементов сети для базового и RTS/CTS механизмов доступа к каналу. Похожие результаты были получены авторами F. Cali, M. Conti, E. Gregori в работе [43]. Более подробное описание данного вида математических моделей проводится во второй главе диссертационной работы.

В продолжение проведенного в [41, 42] анализа пропускной способности в работах P. Chatzimisios [44, 45] был проведен анализ зависимости среднего времени задержки передачи пакета на MAC-уровне от числа станций в сети и размера используемых кадров для базового и RTS/CTS механизмов доступа. Полученные в [44, 45] результаты позволили сделать вывод о том, что механизм RTS/CTS имеет преимущество перед базовым режимом в случае передачи длинных пакетов в сети с большим числом станций и наоборот – проигрывает базовому, при малом количестве станций и малой длине пакетов. В [45] дополнительно учитывается ограничение по числу повторных попыток передач пакета при вычислении средней задержки на MAC-уровне. Также необходимо отметить, что достаточно важным результатом работ [41, 42, 44, 45] является выявление факта немонотонной зависимости показателей производительности протокола 802.11 от изменения управляемых параметров канального уровня (размер окна конкуренции, количество попыток передачи), что в свою очередь

предполагает разработку и применение конкретных алгоритмов оптимизации данных параметров.

Вместе с тем, необходимо отметить, что результаты указанных работ получены в предположении идеальности канала передачи, то есть в предположении отсутствия шумов, помех и других мешающих радиосигналов в сети, что, как правило, неизбежно приводит к существенному завышению оценочных значений пропускной способности сети. В ряде работ [46-48] была произведена попытка учета вероятности появления битовых ошибок, при расчете среднего времени задержки передачи пакета в условиях неидеального канала. Так P. Chatzimisios в [46, 48] предложил модель, которая помимо учета числа повторных передач, еще учитывает и вероятность возникновения в канале битовых ошибок. Похожий результат был получен K. Szczypiorski в [47], где проведено исследование зависимости пропускной способности канала от вероятности возникновения ошибок при передаче по каналу. Дополнительно K. Szczypiorski устраняет допущенные P. Chatzimisios неточности, связанные с длиной интервала EIFS при рассмотрении механизма повторных передач. Так же необходимо отметить, что в работах [46-48] была использована модель двоичного симметричного канала без учета суммирования возникающих ошибок, однако уже в [49] те же результаты были получены для канала с суммарной (групповой) ошибкой при использовании модели Гильберта-Эллиотта.

Из результатов полученных G. Bianchi [42] следует, что для идеального канала с увеличением длины пакета пропускная способность сети увеличивается. Однако из результатов, полученных в [46-49] следует, что при наличии в канале помех вероятность появления ошибок в длинных пакетах выше, чем в коротких, что ведет к увеличению числа повторных передач и, как следствие, к снижению пропускной способности сети. При этом в [49] получены зависимости, позволяющие оценить максимальную пропускную способность канала в зависимости от длины пакета с учетом возможных ошибок при его передаче.

Необходимо отметить, что большинство моделей, описывающих механизм доступа DCF для стандарта IEEE 802.11, не учитывают широковещательный трафик, присутствующий в сети. Особенностью такого трафика является его однонаправленность (не требуется прием подтверждающего кадра на переданный широковещательный пакет), которая большинством моделей не рассматривается. В исследованиях, проведенных R. Oliveira [50], особенности широковещательной передачи учитываются, однако предложенный математический аппарат ведет к существенному усложнению модели, предложенной G. Bianchi в работе [41]. R. Oliveira были получены зависимости пропускной способности сети и времени обслуживания пакета от количества станций в сети, длины передаваемого пакета и вероятности появления широковещательного пакета.

Известно, что при работе систем реального времени (систем передающих видеотрафик, речь), с целью выполнения требований QoS, существует необходимость доставки пакета в определенном интервале значений временной задержки с требуемой вероятностью. Большинство рассматриваемых моделей направлено на получение только лишь средних значений рассматриваемых характеристик сети (пропускной способности, времени задержки передачи пакета), при этом не позволяют оценить дисперсию данных характеристик. Вопросам оценки вероятностно-временных характеристик задержек передачи пакетов и пропускной способности сетей стандарта 802.11 посвящено ряд работ [51, 52], где предпринята попытка по получению функции распределения задержки передачи пакетов. Предложенный в [51, 52] математический аппарат, основан на элементарных операциях и позволяет получить значения требуемых характеристик с приемлемым уровнем точности, что подтверждается результатами имитационного моделирования. Следует отметить, что результаты, полученные в [51] применимы только для RTS/CTS режима работы протокола, а результаты, полученные в [52] уже позволяют произвести расчеты и для базового режима с учетом произвольной длины пакета. Одним из новых подходов в области анализа характеристик сетей стандарта IEEE 802.11 является

использование механизма производящих функций<sup>1</sup>. Описание моделей, основанных на аппарате производящих функций, приведено в работах [53, 54]. Данный подход позволяет получить полное вероятностное описание характеристик стандарта IEEE 802.11. Полученные в [53, 54] результаты, применимы как для RTS/CTS, так и базового механизмов доступа. Так же в данных работах учитывается ограничение по числу повторных попыток передач. Однако такой подход не позволяет в явном виде выразить задержку передачи пакета, для этого требуется проводить обращение численными методами производящей функции, что существенно затрудняет использование на практике полученных в [53, 54] результатов.

Отдельное внимание необходимо уделить условию насыщенности сети, которое является одним из **главных** ограничений, используемых в большинстве рассматриваемых работ. Насыщенная сеть предполагает, что очередь каждой станции данной сети всегда имеет готовый пакет для передачи (буфер устройства никогда не пустует). Очевидно, что данное условие существенно упрощает получение основных характеристик работы сети, но при этом дает возможность получить только лишь минимальные оценки эффективности протокола, описывающие средние значения пропускной способности и времени задержки пакета в сети с высокой загруженностью. Однако реальные сети стандарта IEEE 802.11 в процессе своего функционирования большую часть времени находятся в ненасыщенном режиме<sup>2</sup>, то есть очереди элементов сети периодически могут оказываться пустыми, в результате чего значения характеристик работы сети отличаются от значений, полученных с использованием рассмотренных моделей. Исследование ненасыщенных сетей, как правило, осложняется правильным выбором модели, корректно описывающей

---

<sup>1</sup> В общем случае для дискретной случайной величины  $X$  производящая функция может быть записана в следующем виде:  $G_X(z) = E[z^X]$ .

<sup>2</sup> Данная особенность определяется специфичностью различных технологических процессов, например беспроводная сеть ГТП состоит, как правило, из WI-FI датчиков, которые формируют небольшие пакеты с маленькой интенсивностью их следования, а некоторые датчики вообще относятся к разряду аварийных и срабатывают одновременно, в случаях аварийной ситуации, тем самым резко увеличивая нагрузку на сеть.

характер и параметры изменения трафика в сети. В такой ситуации вероятностно-временные характеристики сети существенно зависят от свойств поступающего потока на обслуживание и его структуры.

В работах [55-58, 38] предприняты попытки учета условий произвольной нагрузки в беспроводной сети. Так в работе Chuan Heng Foh [55] предложен подход к оцениванию характеристик стандарта IEEE 802.11, основанный на методе системной аппроксимации, при котором исследуется функция распределения времени задержки пакетов на MAC-уровне и применяется приближение с помощью распределения фазового типа. В работах [56-58, 38] проведена оценка схемы распределенного управления DCF стандарта IEEE 802.11 для условий нормальной нагрузки в сети. Характер поступления пакетов при разработке моделей в данных работах был принят в виде пуассоновского потока с интенсивностью  $\lambda$ . При этом в [56] процесс функционирования беспроводной станции моделируется трехмерной цепью Маркова, где первые две размерности аналогичны [41, 42], а в качестве третьей используется длина очереди. Однако в данных работах результаты получены для условий идеального канала и не учитывают возможное влияние помех.

Модели, основанные на аппарате теории массового обслуживания описаны в работах [59-65]. В этих работах авторами выделяются четыре основные модели систем массового обслуживания, характеризующих процесс функционирования станции сети стандарта IEEE 802.11: M|G|1 в [59-61], M|MMGI|1 в [62], G|G|1 в [63, 64], M|M|1|K в [59, 65]. В работе [65] проводится анализ зависимости характеристик производительности сети от различных моделей обслуживания с применением геометрической аппроксимации произвольного времени обслуживания.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что спектр существующих подходов к оценке производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 достаточно широк. При этом полученные результаты имеют, как правило, локальный по областям и условиям применения характер, обладают определенными достоинствами и недостатками.

## **1.5 Общая постановка задачи диссертационного исследования**

Проведенный в предыдущих разделах анализ предметной области показал, что, несмотря на широкий спектр научных работ (разнообразие аналитических моделей и подходов), особенности функционирования беспроводных сетей при оценке их производительности до сих пор недостаточно полно учтены. Так полученные результаты оказываются неприменимы в условиях нормальной нагрузки, когда очереди станций периодически оказываются пустыми, а также в условиях помех и искажений передаваемых пакетов. Кроме того, изменение параметров канального уровня протокола IEEE 802.11 (размер окна конкуренции, количество попыток передачи) по-разному влияют на его производительность, что требует наличие алгоритмов их настройки (с целью оптимизации производительности), а бистабильность протокола предполагает разработку механизмов предотвращения перегрузок в сети. Также одним из значимых результатов проведенного в разделе 1.4 анализа целесообразно считать подтверждение актуальности исследований по дальнейшей разработке теоретических основ в области беспроводной передачи информации, методов проектирования и оптимизации параметров протоколов, направленных на повышение их эффективности функционирования, в том числе за счет повышения их общей пропускной способности.

В связи с этим актуальной является научная задача по разработке математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале, а также разработка на основе данной модели комплекса алгоритмов по настройке параметров канального уровня (за счет поиска их оптимальных значений) беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 и управлению доступом к среде передачи данных, обеспечивающих повышение пропускной способности сети и ее стабилизацию на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки.

## **Выводы по главе:**

1. В данной главе проведен анализ существующих видов распределенных систем. Показано, что распределенные системы являются неотъемлемой частью всех крупных, территориально разнесённых предприятий. Анализ применимости таких систем показал, что все они имеют сходство в том, что обеспечивают децентрализованное решение отдельных задач, от эффективности решения которых, зависит выполнение общей задачи – управления системой в целом. Примером использования таких систем являются газо (нефти) – транспортные предприятия, в которых они реализуют подсистемы сигнализации, сбора информации, диспетчерского управления и информационного обмена. Проведен анализ применимости беспроводных технологий передачи данных в составе РС, который показал, что наибольшее распространение получил стандарт IEEE 802.11. На примере беспроводных сетей стандарта 802.11b, используемых в газо(нефти) – транспортных системах, показана актуальность задачи по модернизации данных сетей.

2. Проведен анализ существующих механизмов доступа к беспроводному каналу стандарта IEEE 802.11, выявлены их особенности, достоинства и недостатки. Показана алгоритмическая сложность применяемых в стандарте IEEE 802.11 механизмов доступа, связанная со случайностью процесса выбора каждой станцией числа ожидаемых до момента передачи тайм-слотов, не возможностью прямого обнаружения станциями коллизий во время передачи, в связи с полудуплексным режимом работы, а также с возможностью появления "скрытых" станций в сети.

3. Проведен анализ существующих аналитических методов оценки производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне в различных условиях их функционирования. Показано, что, несмотря на широкий спектр научных работ (разнообразие аналитических моделей и подходов), особенности функционирования беспроводных сетей при оценке их производительности до сих пор недостаточно полно учтены. Так полученные результаты оказываются неприменимы в условиях нормальной нагрузки, когда

очереди станций периодически оказываются пустыми, а также в условиях помех и искажений передаваемых пакетов. Кроме того, изменение параметров канального уровня протокола IEEE 802.11 (размер окна конкуренции, количество попыток передачи) по-разному влияют на его производительность, что требует наличие алгоритмов их настройки (с целью оптимизации производительности), а бистабильность протокола предполагает разработку механизмов предотвращения перегрузок в сети.

По результатам проведенного анализа предметной области осуществлена общая постановка задачи диссертационного исследования.



## **ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ СТАНДАРТА IEEE 802.11 С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ЗАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И ВОЗМОЖНОГО ИСКАЖЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАКЕТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ**

### **2.1 Постановка задачи по разработке математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале**

Канал беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, как правило, представляет собой среду передачи между абонентским устройством и точкой доступа. В такой сети основным элементом является точка доступа, так как через неё происходит обмен данными между компонентами организуемой локальной сети, а также, при необходимости, организуется подключение к различным внешним сетям.

Ранее отмечалось, что эффективность функционирования телекоммуникационной системы (сети) в общем случае определяется продуктивностью использования ресурсов системы, которая в свою очередь определяет производительность данной системы. Под производительностью сети передачи данных принято понимать показатель, характеризующий число требований, обслуженных в единицу времени при заданных параметрах нагрузки. Показатель производительности в общем случае характеризует эффективность использования выделенного для сети ресурса (частотного, временного, пространственного).

Основными показателями, характеризующими эффективность функционирования сети передачи данных с коммутацией пакетов являются [66, 67, 68]:

- пропускная способность;
- вероятности потерь или блокировки пакетов;
- задержка передачи и вариация задержки передачи пакетов.

Пропускная способность сети – это максимально возможная скорость обработки трафика, определенная стандартом технологии, на базе которой построена сеть. Пропускная способность отражает максимально возможный объем данных, передаваемый сетью или ее частью в единицу времени. Следует отметить, что с точки зрения качества обслуживания параметры пропускной способности сети передачи данных являются одной из основных характеристик QoS.

Вероятности потерь или блокировки пакетов – это показатель отношения суммарного числа потерянных пакетов к общему числу принятых пакетов в выбранном наборе переданных и принятых пакетов [69].

Задержка передачи пакета – это показатель времени доставки пакета между источником и получателем для всех пакетов, как успешно переданных, так и переданных с ошибками [70]. При этом вариация задержки передачи пакетов характеризует диапазон изменений данной задержки (джиттер).

Анализ, проведенный в первой главе, показал, что в большинстве анализируемых распределенных систем беспроводный сегмент передачи данных реализован на базе стандарта IEEE 802.11 с распределенной схемой управления DCF. Поэтому дальнейшие исследования по оценке производительности канального уровня стандарта IEEE 802.11 будут осуществляться применительно к данному механизму распределенного управления.

В большинстве существующих научных работ, посвященных исследованиям производительности беспроводных локальных сетей [41-43, 45, 47, 71-73], делается предположение, что элементы сети находятся в состоянии насыщения. Данное предположение основано на том, что сеть функционирует в условиях высокой трафиковой нагрузки, когда в любой момент времени ко всем станциям сети всегда имеются непустые очереди, то есть в буферах элементов сети всегда имеются пакеты готовые к передаче. Однако на практике такое предположение часто не выполняется и в некоторых распределенных системах преобладающим режимом работы является ненасыщенный режим. Данный режим характеризуется ситуацией, когда буферы (очереди) элементов сети (станций)

периодически оказываются пустыми, то есть не имеют готовых пакетов для передачи. Следует отметить, что результаты, полученные в [41, 72] показывают хорошую применимость при оценке производительности насыщенных сетей, при этом для условий нормальной загрузки (ненасыщенное состояние) дают существенно завышенные оценки среднего времени обслуживания поступающих пакетов и изначально содержат избыточность в распределении канального ресурса.

В работах [55-58] авторами производится описание функционирования беспроводной локальной сети в условиях нормальной загрузки и идеального канала (без учета возможного влияния помех), однако при этом не учитываются следующие важные моменты, характерные для реальных сетей стандарта IEEE 802.11 [1]:

- если в очереди элемента сети (станции) следующий для передачи пакет отсутствует (очередь пустая), то данный элемент переходит с минимальным окном конкуренции в состояние отсрочки и только, после того, как закончится время отсрочки, переходит в состояние простоя (при условии пустой очереди);

- если элемент сети находится в состоянии простоя, то поступающий на него пакет сразу будет передан, в случае не занятости канала на момент его поступления и отсутствия передачи в предшествующих интервалах DIFS и EIFS;

- возможность неудачной передачи пакетов не только из-за возникновения коллизий, но и из-за искажения пакета в результате воздействия помех.

Следовательно, задача по оценке производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, в условиях ненасыщенного состояния сети, при наличии помех и при необходимости выполнения требований QoS к передаваемому трафику, к настоящему времени полностью не решена и является актуальной.

Целью проводимого исследования является разработка аналитической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии, при наличии помех в радиоканале и оценка производительности таких сетей с учетом выполнения требований QoS к передаваемому трафику.

## 2.2 Определение модели систем массового обслуживания, описывающей ненасыщенное состояние беспроводного канала связи

В общем случае, трафик произвольной сети состоит из отдельно поступающих дискретных объектов (заявок, пакетов, кадров, ячеек и т.п.), и может быть математически описан как точечный процесс, состоящий из последовательности поступлений заявок (пакетов) в моменты времени  $t_1, t_2, \dots$  начиная от 0 (условно  $t_0 = 0$ ). При этом характер поступления заявок для  $n$  элементов сети и их обслуживание может описываться различными моделями систем массового обслуживания (СМО) [74-77]. Наиболее простыми являются пуассоновские модели типа М/М/1 (или М/М/1/п с ограниченным буфером), которые позволяют гарантировать ненасыщенное состояние канала [78, 79]. Рассмотрим данные модели более подробно.

Пуассоновские модели – это самые известные модели трафика, возникшие с появлением телефонии и введенные пионером проектирования телефонных сетей А. К. Эрлангом [80, 81]. В пуассоновских процессах интервалы времени  $\{T_n\}$  между поступлениями заявок распределены экспоненциально, с параметром интенсивности  $\lambda$ , то есть функция распределения данных интервалов имеет следующий вид:

$$P\{T_n \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2.1)$$

На рисунке 2.1 представлена схема системы массового обслуживания типа М/М/1 [82]. Данная система содержит:

- входной поток заявок на обслуживание;
- буфер, способный хранить очередь бесконечной длины;
- обслуживающее устройство;
- выходной поток обслуженных заявок.

В данной СМО заявки (пакеты) поступают на вход буфера в случайные моменты времени. Если в момент поступления заявки буфер пуст и обслуживающее устройство свободно, то заявка сразу же передается в это

устройство для обслуживания. Обслуживание также длится случайное время. Если в момент поступления заявки буфер пуст, но обслуживающее устройство занято обслуживанием ранее поступившей заявки, то заявка ожидает его завершения в буфере. Как только обслуживающее устройство завершает обслуживание очередной заявки, она передается на выход, а прибор выбирает из буфера следующую заявку (если буфер не пуст). Выходящие из обслуживающего устройства заявки образуют выходной поток. Буфер считается бесконечным, то есть заявки никогда не теряются из-за того, что исчерпана емкость буфера [83]. Если прибывшая заявка застаёт буфер не пустым, то она становится в очередь и ожидает обслуживания. Заявки выбираются из очереди в соответствии с реализованной в обслуживающем устройстве дисциплиной обслуживания (например, дисциплина обслуживания FIFO (First-In, First-Out) первым пришел – первым обслужен).

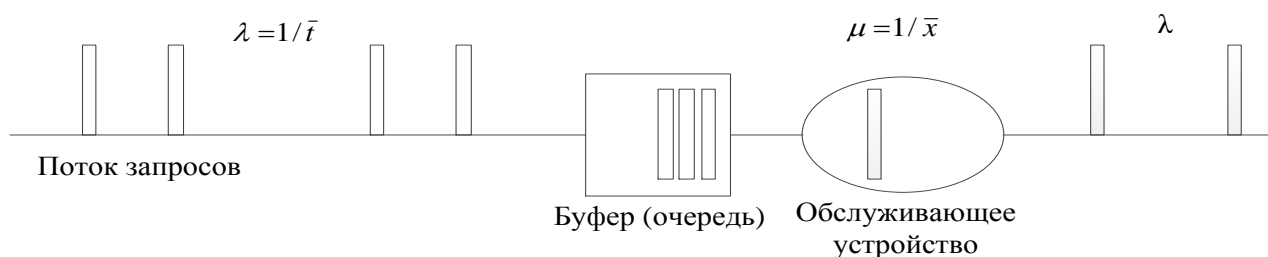


Рисунок 2.1 – Схема системы массового обслуживания типа M/M/1

Так как входной процесс в данной модели ординарный, то в каждый момент времени к очереди может добавиться только одна заявка; поскольку обслуживающее устройство одно, то в каждый момент времени может быть обслужена, то есть уйти из очереди, лишь одна заявка. Следовательно, рассматриваемая модель СМО может быть отнесена к процессу класса "гибели-размножения", если полагать, что все интенсивности размножения  $\lambda_k$  и гибели  $\mu_k$  постоянны и равны соответственно [79]:

$$\lambda_k = \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$\mu_k = \mu, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

В этом случае средняя длина промежутка между соседними заявками равна  $\bar{t} = 1/\lambda$  и среднее время обслуживания заявки равно  $\bar{x} = 1/\mu$  (это следует из того,

что обе случайные величины  $\bar{t}$  и  $\bar{x}$  распределены по показательному закону). На рисунке 2.2 приведена диаграмма интенсивностей переходов для рассматриваемой СМО типа М/М/1.

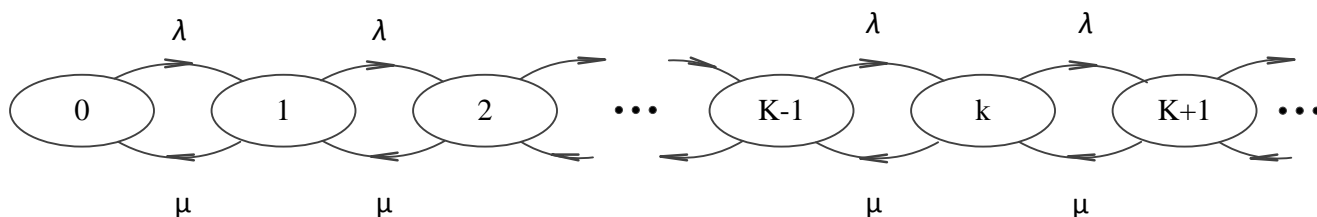


Рисунок 2.2 – Диаграмма интенсивностей переходов в системе М/М/1

На основании [79] можно записать вероятность  $P_k$  того, что в стационарном состоянии в системе будет находиться  $k$  заявок:

$$P_k = q \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda}{\mu} = q \cdot \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k; \quad k \geq 0, \quad (2.2)$$

где  $q$  – вероятность отсутствия заявок в системе (вероятность пустой очереди), которая может быть определена в соответствии со следующим выражением:

$$q = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda/\mu}{1 - \lambda/\mu}} = 1 - \frac{\lambda}{\mu}. \quad (2.3)$$

В [79] показано, что необходимым и достаточным условием эргодичности<sup>3</sup> для рассматриваемой системы М/М/1 (а, следовательно, условием существования стационарного решения  $P_k > 0$ ) является выполнение следующего неравенства  $\lambda/\mu < 1$ , что тождественно выполнению неравенства  $\lambda < \mu$ .

Обозначив отношение  $\rho = \lambda/\mu$ , как коэффициент использования ресурсов обслуживающего устройства (или по-другому как коэффициент нагрузки), тогда выражение (2.2) примет следующий вид:

$$P_k = (1 - \rho) \cdot \rho^k; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

Очевидно, что для условий стационарного режима, требуется, чтобы  $0 \leq \rho < 1$ .

<sup>3</sup> Состояние называется эргодическим, если оно апериодично и возвратно ненулевое. Если все состояния цепи Маркова эргодичны, то вся цепь называется эргодической [78].

Таким образом, система типа М/М/1 в стационарном режиме гарантирует выполнение неравенства  $\rho < 1$ , тем самым позволяет обеспечить ненасыщенное состояние буфера элемента беспроводной сети при различных значениях отношений интенсивностей  $\lambda$  к  $\mu$ . Поэтому в дальнейших исследованиях примем модель поведения беспроводной станции стандарта 802.11 как модель СМО типа М/М/1.

Следует отметить, что наиболее важными характеристиками любой СМО являются среднее число заявок и среднее время пребывания заявки в системе [79]. Для СМО типа М/М/1:

- среднее число заявок в системе задается следующим равенством:

$$\bar{N} = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot P_k = (1 - \rho) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot \rho^k = \frac{\rho}{1 - \rho}; \quad (2.5)$$

- среднее время пребывания в системе определяется с помощью формулы Литтла:

$$T = \frac{\bar{N}}{\lambda} = \left( \frac{\rho}{1 - \rho} \right) \cdot \left( \frac{1}{\lambda} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot P_k = \frac{1/\mu}{1 - \rho}. \quad (2.6)$$

Графики зависимости среднего числа заявок и среднего время пребывания в системе от коэффициента нагрузки  $\rho$  представлены на рисунке 2.3. Данные графики показывают, что при стремлении коэффициента  $\rho$  к единице как среднее число заявок в системе, так и среднее время пребывания заявки в ней неограниченно возрастают.

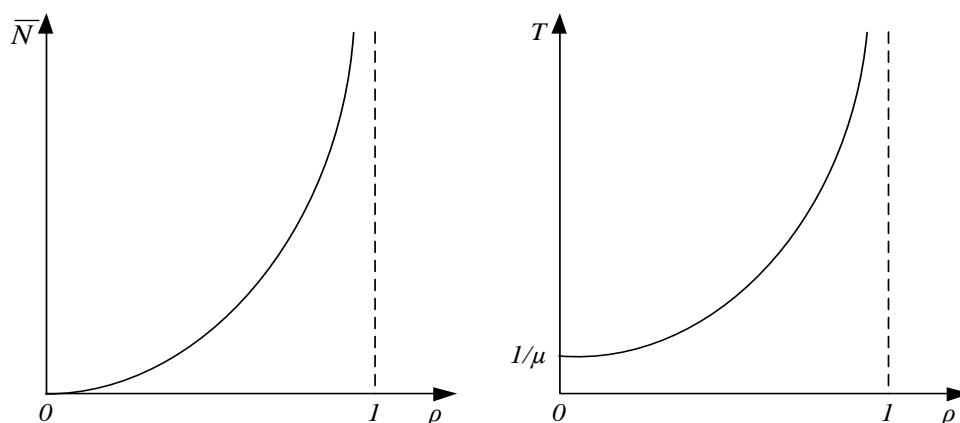


Рисунок 2.3 – Графики зависимости среднего числа заявок и среднего время пребывания в системе от коэффициента нагрузки  $\rho$

### **2.3 Марковская модель изменения состояний элементов СПД стандарта IEEE 802.11 в условиях идеального канала и при высокой нагрузке в сети (насыщенное состояние сети)**

Модель поведения элемента беспроводной сети при реализации механизма распределенной функции координации DCF может быть представлена в виде цепи Маркова с дискретным целочисленным временем [84-92], единицей которого является виртуальный слот – промежуток времени между последовательным изменением счетчика отсрочки у каждого элемента сети, не находящегося в состоянии простоя [38, 41, 42]. Такой подход впервые был предложен G. Bianchi в научной работе, посвященной анализу производительности стандарта IEEE 802.11 DCF [41]. Модель, предложенная в [41, 42], предполагает, что виртуальные слоты являются не одинаковыми и каждый из них может представлять собой:

- "пустой" слот отсрочки передачи длительностью  $\sigma$ , в котором ни одна из станций сети не осуществляет передачу и канал остается свободным;

- "успешный" слот, в котором только одна из станций сети осуществляет передачу пакета;

- "коллизийный" слот, в котором одновременно осуществляют передачу несколько станций сети (или по-другому – это слот, во время которого произошла коллизия).

При этом в [42] предполагается, что в начале каждого временного слота любой элемент сети выходит на передачу с одинаковой вероятностью, равной  $\tau$ . Также в [42] введено предположение о постоянстве вероятности столкновения пакетов  $p$ , переданного каждым элементом сети, независимо от числа совершенных повторных передач. Как показывает моделирование [42], эти предположения приводят к достаточно точным результатам, особенно когда число станций в беспроводной сети довольно большое (больше десяти). В [42] поведение отдельных элементов сети предполагается независимым и описывается марковской цепью, граф которой представлен на рисунке 2.4.



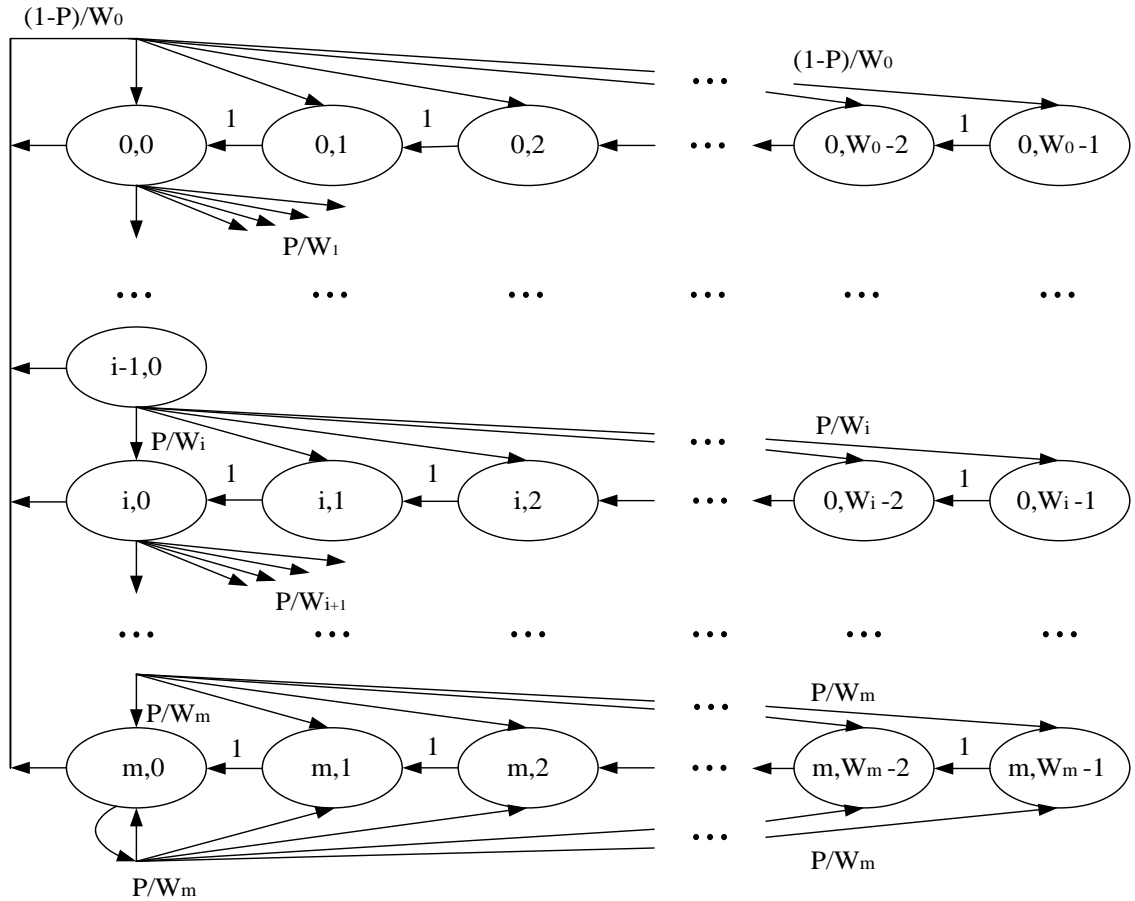


Рисунок 2.4 – Цепь Маркова, описывающая модель изменения состояния элементов беспроводной сети

Цепь Маркова представляет собой двумерный случайный процесс  $\{s(t), b(t)\}$ , где  $b(t)$  и  $s(t)$  – случайные процессы, описывающие состояние счетчика обратного отсчета и его уровень соответственно, для данного элемента сети во временном слоте  $t$ . Возможными являются лишь ненулевые одношаговые переходы из одного состояния в другое, условные вероятности которых описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k + 1\} = 1, & k \in (0, W_i - 2), i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} = (1 - p) / W_0, & k \in (0, W_0 - 1), i \in (0, m) \\ P\{i, k | i - 1, 0\} = p / W_i, & k \in (0, W_i - 1), i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} = p / W_m, & k \in (0, W_m - 1) \end{cases}, \quad (2.7)$$

где

$$P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t + 1) = i_1, b(t + 1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\}. \quad (2.8)$$

Из этой системы уравнений могут быть получены стационарные состояния цепи Маркова, с использованием которых в [42] получены выражения для вероятностей передачи  $\tau$  и коллизий  $p$  передаваемого кадра:

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W_0+1) + pW_0(1-(2p)^m)}, \quad (2.9)$$

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1}. \quad (2.10)$$

Выражения (2.9), (2.10) образуют систему нелинейных уравнений, решение которой может быть получено известными численными методами.

Следует отметить, что разработанная в [42] модель оказалась базовой для проведения дальнейших исследований, направленных на ее совершенствование применительно к различным условиям функционирования беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11. Так в ряде работ [43, 45, 47, 93] был проведен анализ зависимости производительности беспроводных сетей от таких основных параметров, как размера окна конкуренции, максимальное количество повторных передач, длина передаваемого пакета и т.д. В [45, 93-95] получены результаты аналитической оценки пропускной способности сети и временных задержек обслуживания пакетов в условиях возникновения битовых ошибок в канале. Результаты, полученные в [45, 93, 96] имеют хорошую апробацию и подтверждаются результатами имитационного моделирования.

Однако, проведенный анализ существующих подходов [41-43, 45, 47, 72, 93, 97-99] к оценке производительности локальных сетей стандарта IEEE 802.11 показал, что данные подходы основаны на предположении о **насыщенном** состоянии сетей, то есть анализируемые сети функционируют в условиях высокой трафиковой нагрузки, когда в любой момент времени ко всем станциям сети всегда имеются непустые очереди (в буферах элементов сети всегда имеются пакеты готовые к передаче). При этом на практике данное предположение не всегда бывает оправданным, а результаты оценки производительности локальных сетей без учета состояния их элементов (насыщенное, ненасыщенное) имеют, как правило, приближенный характер. Кроме того результаты указанных работ получены в предположении идеальности канала передачи, то есть в

предположении отсутствия шумов, помех и других мешающих радиосигналов в сети, что на практике, как правило, не выполняется и неизбежно приводит к существенному завышению значений пропускной способности сети.

## **2.4 Марковская модель изменения состояний элементов СПД стандарта IEEE 802.11, учитывающая ненасыщенное состояние сети и возможное искажение передаваемых пакетов в результате воздействия помех в радиоканале**

Для разработки стохастической марковской модели изменения состояний элементов СПД стандарта IEEE 802.11 при нормальной нагрузке в сети (ненасыщенное состояние) и наличии помех в радиоканале воспользуемся подходом, изложенным в [42].

Исследуем беспроводную сеть, состоящую из  $n$  элементов сети (станций), имеющих одинаковые вероятностные распределения длин пакетов (кадров)  $F(L_p)$ , формируемых для передачи в канал. Примем, что модель поведения беспроводной станции описывается моделью СМО типа М/М/1 (поступление пакетов описывается в виде пуассоновского потока<sup>4</sup> с интенсивностью  $\lambda_k$  и скоростью обработки пакетов  $\mu_k$  ( $k = 1 \dots n$ ), размер буфера каждой станции сети бесконечен).

Следовательно, в соответствии с результатом, полученным в п.п. 2.2 (выражение (2.3)), вероятность пустой очереди (вероятность отсутствия передачи)

---

<sup>4</sup> Определение потока как пуассоновского, косвенно можно обосновать особенностями функционирования технологических беспроводных сетей, например сетей, функционирующих в составе ГТП. Трафик, циркулирующий в данных сетях может быть условно отнесен к опосредованному трафику типа М2М (Machine-to-Machine, в терминологии концепции Интернета Вещей) [141-144]. Опосредованный трафик производится в системах с активными устройствами под влиянием различных внешних процессов (например, срабатывание различного рода датчиков, в следствии возникновения событий аварийного характера). В зависимости от конкретного приложения системы мониторинга, характер этих процессов может быть различен. В ряде научных работ показано [141-144], что производимый такого рода системами трафик, в зависимости от параметров может иметь свойства простейшего потока (параметр Хёрста  $H \approx 0,5$ ) или антиперсистентного потока ( $H < 0,5$ ).

$q_k$  у элемента сети  $k$  ( $k = 1 \dots n$ ) может быть определена следующим выражением:

$$q_k = 1 - \lambda_k / \mu_k. \quad (2.11)$$

Будем считать, что доступ в канал осуществляется с использованием, как базового механизма доступа (механизм без "квитирования") стандарта IEEE 802.11, так и механизма RTS/CTS (механизм с "квитированием"). При этом короткие пакеты, чья длина не превышает некоторого порога  $\overline{L}_p$ , передаются с помощью базового механизма доступа, а длинные пакеты, длина которых превышает порог  $\overline{L}_p$ , передаются с помощью механизма RTS/CTS.

Предположим, что в канале могут присутствовать помехи, воздействие которых приводит к искажению передаваемых пакетов, что в свою очередь требует повторной передачи таких пакетов. Модель воздействующих помех, причины их происхождения и степень влияния не являются предметом исследований данной работы. При этом учет влияния помех на производительность беспроводной сети в разрабатываемой модели осуществляется за счет введения вероятности повреждения кадра помехой  $p_f$ , которая имеет численное значение и аналитически обоснована в [45, 93, 38]. Так, согласно [45, 93] вероятность повреждения (искажения) кадра  $p_f$  длиной  $L_p$  байт, в результате воздействия помехи, может быть определена следующим выражением:

$$p_f = 1 - \exp\{-L_p \cdot BER\}, \quad (2.12)$$

где  $L_p$  – длина кадра, в байтах;  $BER$  (Bit Error Rate) – вероятность битовой ошибки, характеризует интенсивность воздействующих помех.

Следует отметить, что выражение (2.12) достаточно полно характеризует взаимосвязь вероятности повреждения кадра  $p_f$  в зависимости от его длины и интенсивности воздействующих помех. Действительно, чем длиннее кадр (пакет) или, чем выше интенсивность воздействующих помех, тем больше вероятность

искажения передаваемого кадра. Также необходимо отметить, что в общем случае длина кадра, передаваемого на физическом уровне, представляет собой сумму длин заголовка кадра и тела кадра, то есть  $L_p = L_{PHY} + L_{DATA}$ . Будем считать, что заголовок кадра не подвержен искажениям и передается надежно, что можно обосновать более низкой скоростью его передачи и применением более эффективных схем кодирования на PHY-уровне. Тогда искажениям может подвергаться только тело кадра (DATA-кадр).

Полагая, что расстояния между элементами сети незначительные, можно предположить, что воздействующие помехи оказывают одновременное влияние на все элементы сети. Также в рамках настоящих исследований предполагается, что вносимые помехами искажения статистически независимы, что имеет место в случае канала с аддитивным гауссовым шумом. При этом интенсивность помех  $BER$  будем считать постоянной и независимой от расположения источника и получателя пакетов.

По аналогии с [38, 42, 72, 100], при анализе механизма доступа DCF, введем допущение, что все элементы сети изменяют значения своих счетчиков отсрочки (задержки) непосредственно после интервала DIFS или SIFS. Данные интервалы определяют завершение текущей попытки передачи, то есть передававшая станция изменяет свое конкурентное окно и выбирает для передачи слот случайной задержки, на основании разыгранной с использованием усеченного экспоненциального двоичного алгоритма отсрочки, при этом остальные станции просто уменьшают свои счетчики на единицу. Таким образом, в начале каждого виртуального слота любая станция сети может осуществлять передачу пакета.

В соответствии с терминологией, введенной в предыдущей главе, разобьем все время работы станции беспроводной связи на следующие виртуальные временные слоты: "пустой", "успешный", "коллизийный" и "слот с ошибкой в кадре". Введем обозначения  $P_o$ ,  $P_s$ ,  $P_c$ ,  $P_e$  для вероятностей "пустого", "успешного", "коллизийного" и "с ошибкой в кадре" слотов соответственно. Здесь мы расширили количество возможных слотов, за счет добавления слота, в котором произошла ошибка в передаваемом кадре в результате воздействия помех. Графическая интерпретация виртуальных слотов для базового механизма

доступа стандарта IEEE 802.11 представлена на рисунке 2.5. Из данного рисунка видно, что времена виртуальных слотов не имеют прямого соответствия реальному времени, то есть, например, реальное время, прошедшее при изменении состояния счетчика отсрочки передачи с  $t$  на  $t + 1$  оказывается больше длительности пустого слота, при условии наличия передачи другой станцией [101].

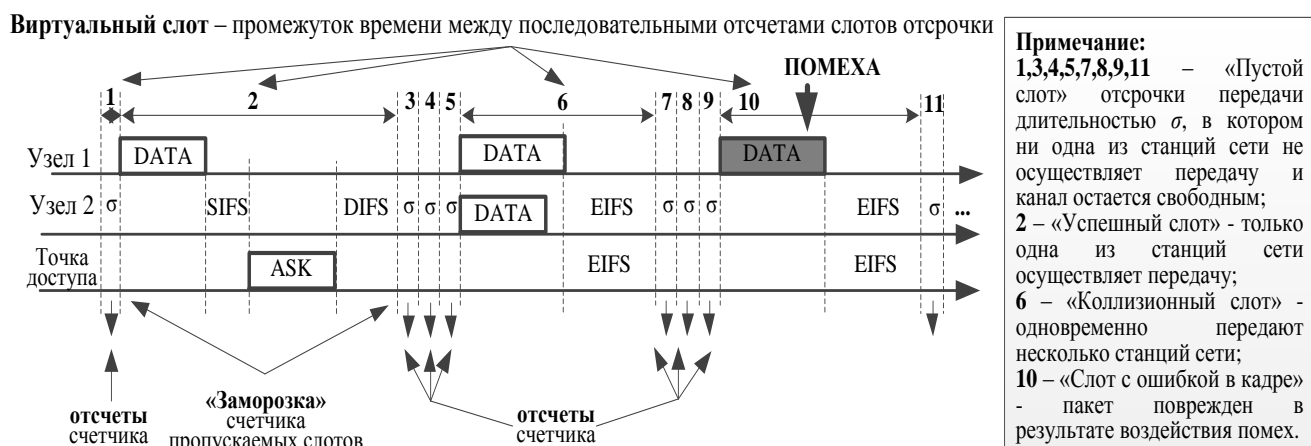


Рисунок 2.5 – Графическая интерпретация виртуальных слотов для базового механизма доступа стандарта IEEE 802.11

Далее будет осуществлено вероятностное и временное описание каждого из рассмотренных виртуальных слотов на основе математического аппарата цепей Маркова. Напомним, что разрабатываемая модель рассматривает ненасыщенные состояния для  $n$  статистически независимых элементов сети, которые конкурируют в точке доступа за предоставление ресурса пропускной способности в беспроводном канале.

Рассмотрим  $b(t)$  – стохастический процесс, представляющий размер окна конкуренции (задержки передачи) для определённого элемента сети в интервале времени  $t$ . Моменты времени  $t$  и  $t + 1$  соответствуют началу двух последовательных виртуальных слотов, при этом элемент сети начинает передачу пакета когда счетчик, описывающий целочисленные изменения процесса  $b(t)$ , станет равным нулю.

Определим  $s(t)$ , как стохастический процесс, представляющий собой этап задержки  $(0, \dots, m, \dots, m + \Delta m)$ , характеризующий число предпринятых элементом сети попыток передачи текущего пакета, где  $m$  – максимальное количество таких попыток. Одним из возможных состояний процесса  $s(t)$  является состояние  $\{-1\}$ , которое указывает на то, что очередь элемента сети пуста, при этом размер окна конкуренции в данном состоянии определяется также как в состоянии  $\{0\}$ . Определим  $\Delta m$ , как некий этап дополнительной задержки, связанный с введением дополнительных попыток передачи пакета при достижении их максимального числа  $m$ . Обоснование необходимости введения величины  $\Delta m$  будет проведено в следующей главе, а сейчас определим, что введение дополнительных попыток передачи для определенного класса пакетов обусловлено необходимостью выполнения требований качества обслуживания (QoS).

В соответствии с введенными допущениями и предположениями проведем описание двумерного процесса  $\{s(t), b(t)\}$  в стационарном состоянии. Согласно [78] вероятностный процесс с дискретным пространством состояний называется цепью Маркова. При этом множество некоторых случайных величин  $\{X_n\}$  образует цепь Маркова, если вероятность того, что следующее значение (состояние) равно  $X_{n+1}$ , зависит только от текущего значения (состояния)  $X_n$  и не зависит от предыдущих значений процесса, то есть случайная последовательность  $\{X_n\}$  имеет зависимость только от прошлого состояния, отличающегося от текущего на одну единицу времени [78]. В соответствии с этим, учитывая дискретный характер стохастических процессов  $s(t)$  и  $b(t)$ , двумерный процесс  $\{s(t), b(t)\}$  в стационарном состоянии может быть описан с использованием цепи Маркова. Описание переходов между состояниями элемента беспроводной сети представлено на графе цепи Маркова, изображенного на рисунке 2.6. Данная цепь Маркова используется для анализа как насыщенных, так и ненасыщенных состояний беспроводной сети.

В каждый момент времени элемент сети может находиться в состоянии  $\{i, l\}$ , где  $i$  – это этап задержки со значением в интервале  $(0, 1, \dots, m + \Delta m)$ , а  $l$  является счетчиком времени задержки со значением во временном интервале  $(0, 1, \dots, W_i - 1)$ .

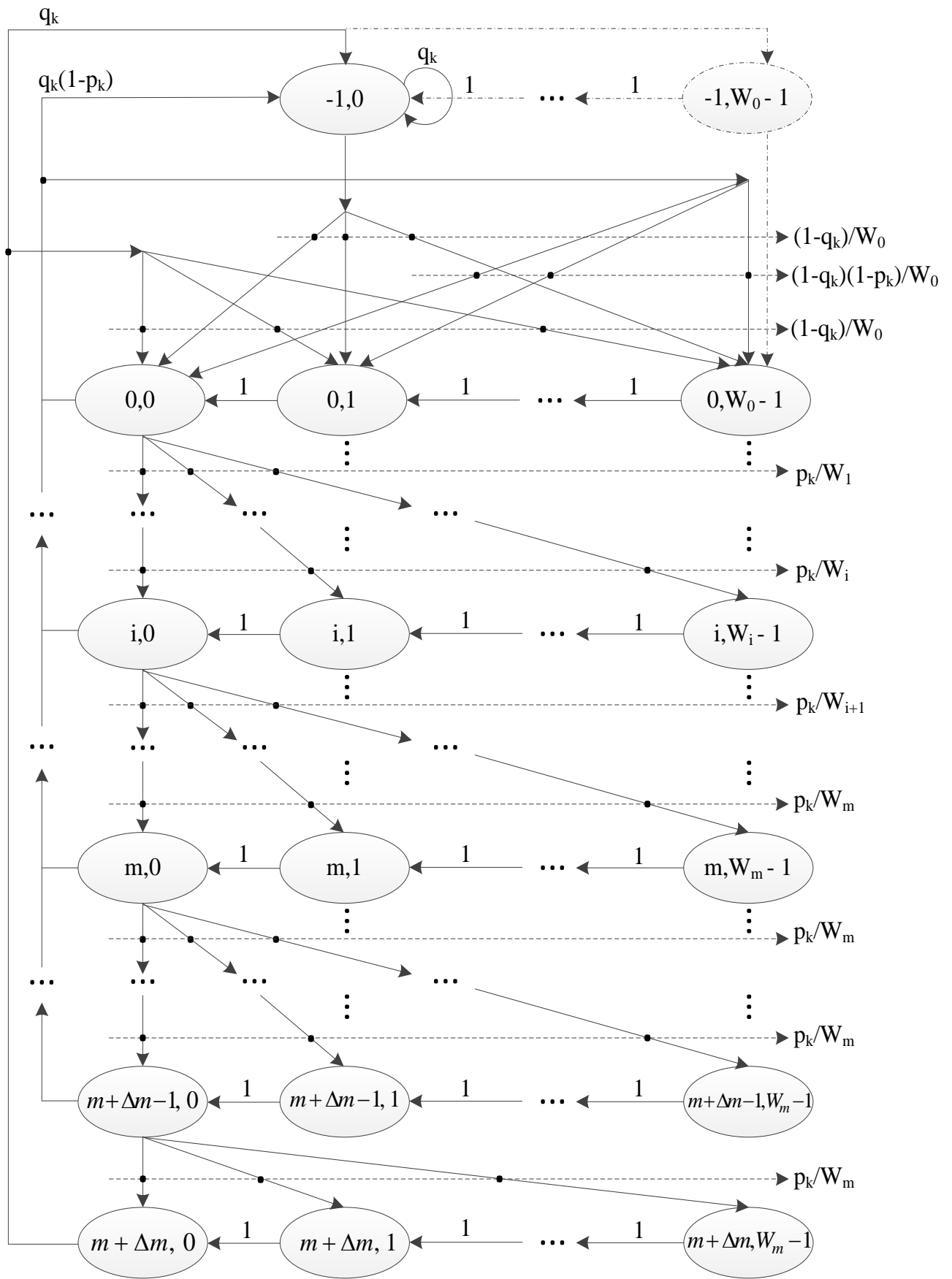


Рисунок 2.6 – Цепь Маркова, описывающая изменения состояний элементов сети для насыщенного и ненасыщенного канала



Отметим, что этап задержки  $i$  определяет номер попытки передачи беспроводной станцией текущего пакета, при этом повторная попытка передачи является следствием неудачной предыдущей попытки. Для станции стандарта IEEE 802.11 основанием для повторной передачи пакета является отсутствие в отведенное время от корреспондирующей станции подтверждающего кадра АСК, который уведомляет об успешном приеме пакета. К сожалению, станции стандарта IEEE 802.11 не могут распознать причину неудачной передачи пакета, так как работают в полудуплексном режиме. При этом причиной неудачной передачи может являться как возникшая коллизия (из-за одновременной передачи несколькими станциями в сети), так и помеха, исказившая передаваемый пакет. Исходя из этого и в соответствии с выражением (2.12) обозначим вероятность повреждения (искажения) кадра как  $p_f$ , а вероятность коллизий (одновременной передачи несколькими станциями) для элемента сети  $k$ , как  $p_c$ . Вероятность ошибки в кадре и вероятность коллизий являются статистически независимыми характеристиками.

В соответствии с этой идеологией построения цепи Маркова (рисунок 2.6) предполагает, что переход от одного этапа задержки к следующему (этап  $i$ ) является следствием возникших (в ходе текущей попытки передачи) коллизий или ошибки в передаваемом кадре (в результате воздействия помех). Тогда вероятность неудачной передачи  $p_k$  может быть определена как:

$$p_k = 1 - (1 - p_f)(1 - p_c) = p_f + p_c - p_f p_c \quad (2.13)$$

Теперь опишем процедуру изменения состояний элементов сети в соответствии с разработанной цепью Маркова. Состояние  $\{-1, 0\}$  указывает, что очередь элемента сети пуста, то есть в ней отсутствуют готовые для передачи пакеты. При появлении пакета доступного для передачи, элемент сети переходит в одно из состояний в строке "0" с вероятностью  $(1 - q_k)/W_0$  (где  $q_k$  определяется выражением (2.11), а  $W_0$  – размер минимального окна конкуренции, порядок формирования которого подробно рассмотрен в п.п. 1.3). В случае неудачной попытки передачи в состоянии  $\{i, 0\}$ , элемент сети переходит в одно из состояний

в строке  $i+1$  с вероятностью  $p_k/W_{i+1}$ . После успешной передачи элемент сети переходит в состояние  $\{-1,0\}$  с вероятностью  $(1-p_k)q_k$ , при условии отсутствия в его буфере пакета готового для следующей передачи (то есть буфер данного элемента сети пуст) или к одному из состояний в строке "0", с вероятностью  $(1-p_k)(1-q_k)/W_0$ , при условии, что буфер данного элемента сети содержит готовый пакет для следующей передачи. Когда элемент сети достигает строки  $m$ , время конкуренции увеличивается до максимального значения, при этом элемент сети пытается осуществить ещё не более  $\Delta m$  повторных передач с максимальным, но фиксированным размером окна конкуренции. Когда элемент сети достигает этапа  $m+\Delta m$  и таймер задержки уменьшается до нуля, кадр либо успешно передаётся с вероятностью  $\tau_k$  или отбрасывается с вероятностью  $P_{отк}$ . При этом элемент сети возвращается в состояние  $\{-1,0\}$  с вероятностью  $q_k$  (если очередь пуста) или к одному из состояний в строке "0" с вероятностью  $(1-q_k)/W_0$  (если в очереди имеется пакет готовый к передаче).

В соответствии с графом цепи Маркова (рисунок 2.6), описывающей изменения состояний элементов сети для насыщенного и ненасыщенного канала, определим возможные одношаговые переходы между состояниями и соответствующие вероятности данных переходов:

-  $P\{i,l | i,l+1\} = 1, i \in (0, m + \Delta m); l \in (0, W_i - 1)$  – данный переход определяет уменьшение счетчика отсрочки во временном интервале  $(0, 1, \dots, W_i - 1)$ ;

-  $P\{i,l | i-1,0\} = \frac{p_k}{W_i}, i \in (0, m + \Delta m); l \in (0, W_i - 1)$  – данный переход определяет неудачную попытку передачи и переход на следующий этап задержки в интервале  $(0, 1, \dots, m + \Delta m)$ ;

-  $P\{0,l | i,0\} = \frac{(1-p_k) \cdot (1-q_k)}{W_0}, i \in (0, (m + \Delta m) - 1); l \in (0, W_0 - 1)$  – данный переход определяет удачную попытку передачи и в буфере элемента сети есть готовый пакет для передачи;

$$- P\{-1, l | i, 0\} = \frac{(1 - p_k) \cdot q_k}{W_0}, \quad i \in (0, (m + \Delta m) - 1); \quad l \in (0, W_0 - 1) \quad - \text{данный}$$

переход определяет удачную попытку передачи и в буфере элемента сети нет готового пакета для передачи;

$$- P\{0, l | m, 0\} = \frac{(1 - p_k) \cdot (1 - q_k) + p_k \cdot (1 - q_k)}{W_0} = \frac{1 - q_k}{W_0}, \quad l \in (0, W_0 - 1) \quad -$$

данный переход определяет последнюю  $m$  попытку передачи, после которой пакету отказывается в обслуживании (пакет отбрасывается из буфера) и в буфере элемента сети есть готовый пакет для передачи;

$$- P\{-1, l | m, 0\} = ((1 - p_k) \cdot q_k + p_k \cdot q_k) / W_0 = q_k / W_0, \quad l \in (0, W_0 - 1) \quad - \text{данный}$$

переход определяет последнюю  $m$  попытку передачи, после которой пакету отказывается в обслуживании (пакет отбрасывается из буфера) и в буфере элемента сети нет готового пакета для передачи;

$$- P\{0, l | m + \Delta m, 0\} = \frac{(1 - p_k) \cdot (1 - q_k) + p_k \cdot (1 - q_k)}{W_0} = \frac{1 - q_k}{W_0}, \quad l = W_m - 1 \quad - \text{данный}$$

переход определяет последнюю  $m + \Delta m$  попытку передачи (после совершения  $\Delta m$  повторных передач с максимальным, но фиксированным размером окна конкуренции), после которой пакету отказывается в обслуживании (пакет отбрасывается из буфера) и в буфере элемента сети есть готовый пакет для передачи;

$$- P\{-1, l | m + \Delta m, 0\} = (1 - p_k) \cdot q_k + p_k \cdot q_k = q_k, \quad l = W_m - 1 \quad - \text{данный переход}$$

определяет последнюю  $m + \Delta m$  попытку передачи (после совершения  $\Delta m$  повторных передач с максимальным, но фиксированным размером окна конкуренции), после которой пакету отказывается в обслуживании и в буфере элемента сети нет готового пакета для передачи;

$$- P\{0, l | -1, 0\} = \frac{1 - q_k}{W_0}, \quad l \in (0, W_0 - 1) \quad - \text{переход из состояния простоя в}$$

состояние задержки. Такой переход возможен, если в момент прихода в буфер пакета среда была занята.

Ранее отмечалось, что производительность беспроводной сети оценивается такими основными показателями как:

- пропускная способность сети;
- среднее время задержки передачи пакета;
- вероятность отказа в обслуживании (передаче) пакета.

По аналогии с [42] определим временной интервал  $T_v$ , как интервал между двумя последовательными успешными передачами пакетов элементов сети. Данный временной интервал будем называть виртуальным временем передачи. Тогда пропускная способность  $C$ , как объем полезной информации переданный за единицу времени, в условиях насыщения может быть определена в соответствии со следующим выражением [42]:

$$C = \frac{V \cdot E[L_p]}{E[T_v]}, \quad (2.14)$$

где  $E[T_v]$  – среднее значение временного интервала  $T_v$ ;  $E[L_p]$  – среднее значение длительности кадра, то есть среднее время передачи полезной информации;  $V$  – скорость передачи MAC-кадра.

Пусть  $b_{i,l} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = l\}, i \in [0, m + \Delta m], l \in [0, W_i - 1]$  – стационарное распределение цепи Маркова (рисунок 2.6), определяющее вероятности  $b_{i,l}$  нахождения станции сети в состоянии  $\{i, l\}$ .

Обозначим как  $\tau_k$  вероятность того, что элемент сети  $k$  производит передачу данных в рассматриваемом временном интервале. Он передаст пакеты, когда счетчик задержки на одном из  $i$  этапов уменьшится до нуля, т.е. будет находиться в состоянии  $\{i, 0\}$ , где  $i \in [0, m + \Delta m]$ .

Следовательно, вероятность передачи  $\tau_k$  может быть представлена как:

$$\tau_k = \sum_{i=0}^{m+\Delta m} b_{i,0}. \quad (2.15)$$

Вероятность отказа в обслуживании (передачи) пакета, при достижении максимального числа повторных попыток передачи значения  $m + \Delta m$ , может быть определена как:

$$P_{откк} = p_k^{m+\Delta m}. \quad (2.16)$$

Вероятность нахождения элемента сети в состоянии  $\{i+1,0\}$ , характеризующего собой переход на следующий  $i+1$  этап задержки в интервале  $(0,1, \dots, m+\Delta m)$ , связанный с неудачной попыткой передачи, может быть получена из вероятности нахождения данного элемента в состоянии  $\{i,0\}$  следующим образом:

$$b_{i+1,0} = p_k b_{i,0}, \text{ при } 0 \leq i < m + \Delta m, \quad (2.17)$$

где  $p_k$  – вероятность неудачной передачи, определяется в соответствии с выражением (2.13).

Таким образом, из выражения (2.17) получается, что:

$$b_{i,0} = p_k^i b_{0,0}, \text{ при } 0 < i \leq m + \Delta m. \quad (2.18)$$

Тогда, вероятность нахождения элемента сети в состоянии  $\{i,l\}$  может быть определена следующим выражением:

$$b_{i,l} = \frac{W_i - l}{W_i} b_{i,0}, \quad i \in [0, m + \Delta m], l \in [0, W_i - 1]. \quad (2.19)$$

Для нахождения вероятностей (2.17) – (2.19) необходимо иметь полную вероятность нахождения элемента сети в состоянии  $\{i = 0, l = 0\}$ , которую несложно получить из следующего выражения:

$$\begin{aligned} b_{0,0} &= (1 - q_k) b_{-1,0} + (1 - q_k) b_{m+\Delta m,0} + (1 - p_k)(1 - q_k) \sum_{i=0}^{m+\Delta m-1} b_{i,0} = \\ &= (1 - q_k) \cdot (b_{-1,0} + p_k^{m+\Delta m} b_{0,0}) + (1 - p_k)(1 - q_k) \sum_{i=0}^{m+\Delta m-1} p_k^i b_{0,0} = \\ &= (1 - q_k) \cdot (b_{-1,0} + p_k^{m+\Delta m} b_{0,0}) + (1 - p_k^{m+\Delta m})(1 - q_k) b_{0,0} = (1 - q_k)(b_{-1,0} + b_{0,0}). \end{aligned} \quad (2.20)$$

В итоге вероятность нахождения элемента сети в состоянии  $\{-1,0\}$ , характеризующего собой состояние его простоя с задержкой минимального окна конкуренции равному нулю, определяется следующим выражением:

$$b_{-1,0} = \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0}. \quad (2.21)$$

На основании (2.21) уточним выражение для вероятности передачи  $\tau_k$ :

$$\tau_k = \sum_{i=0}^{m+\Delta m} b_{i,0} = \sum_{i=0}^{m+\Delta m} p_k^i b_{0,0} = \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} b_{0,0}. \quad (2.22)$$

Теперь определим вероятности нахождения элемента сети в состоянии  $\{0,l\}$ , где  $l$  характеризует этап счетчика отсрочки во временном интервале  $(0,1, \dots, W_i-1)$ .

Для  $0 < i \leq m + \Delta m$  ранее было получено, что  $b_{i,l} = (W_i - l / W_i) b_{i,0}$ . Теперь определим  $b_{i,l}$  при  $i=0$ , имеем:

$$\begin{aligned} b_{0,l} &= (1-p_k)(1-q_k) \frac{W_0-l}{W_0} \sum_{j=0}^{m+\Delta m-1} b_{j,0} + (1-q_k) \frac{W_0-l}{W_0} b_{m+\Delta m,0} + \\ &+ (1-q_k) \frac{W_0-l}{W_0} b_{-1,0} = (1-q_k) \left[ (1-p_k) \frac{W_0-l}{W_0} \sum_{j=0}^{m+\Delta m-1} p_k^j b_{0,0} + \frac{W_0-l}{W_0} p_k^{m+\Delta m} b_{0,0} \right] + \\ &+ (1-q_k) \frac{W_0-l}{W_0} \cdot \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0} = (1-q_k) \frac{W_0-l}{W_0} b_{0,0} + q_k \frac{W_0-l}{W_0} b_{0,0} = \frac{W_0-l}{W_0} b_{0,0}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Учитывая, что все состояния рассматриваемой цепи Маркова (рисунок 2.6) являются возвратными и ненулевыми, имея выражения (2.21), (2.23) проведем нормализацию стационарного распределения цепи Маркова к единице:

$$\begin{aligned} 1 &= b_{-1,0} + \sum_{i=0}^{m+\Delta m} \sum_{l=0}^{W_i-1} b_{i,l} = \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0} + \sum_{i=0}^{m+\Delta m} b_{i,0} \sum_{l=0}^{W_i-1} \frac{W_i-l}{W_i} = \\ &= \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0} + \sum_{i=0}^{m+\Delta m} b_{i,0} \frac{W_i+1}{2} = \\ &= \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0} + \left[ \sum_{i=0}^m p_k^i (2^i W_0 + 1) + \sum_{i=m+1}^{m+\Delta m} p_k^i (2^m W_0 + 1) \right] \frac{b_{0,0}}{2} = \\ &= \frac{q_k}{1-q_k} b_{0,0} + \frac{b_{0,0}}{2} \cdot \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} + \\ &+ \frac{W_0 \cdot b_{0,0}}{2} \cdot \frac{[1-(2p_k)^{m+1}](1-p_k) + p_k(2p_k)^m(1-p_k^{\Delta m})(1-2p_k)}{(1-2p_k)(1-p_k)}. \end{aligned}$$

Из полученного выше уравнения, можно рассчитать вероятность  $b_{0,0}$  как:

$$b_{0,0} = \frac{2}{\frac{2q_k}{1-q_k} + \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} + W_0 \left[ \frac{1-(2p_k)^{m+1}}{1-2p_k} + \frac{p_k(2p_k)^m(1-p_k^{\Delta m})}{1-p_k} \right]}. \quad (2.24)$$

По аналогии с выражением (2.21) определим выражение для вероятности нахождения элемента сети в состоянии  $\{-1,l\}$ , характеризующего собой состояние отсрочки элемента с минимальным окном конкуренции:

$$b_{-1,l} = \frac{2q_k}{(1-q_k) \cdot \left[ \frac{2q_k}{1-q_k} + \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} + W_0 \left[ \frac{1-(2p_k)^{m+1}}{1-2p_k} + \frac{p_k(2p_k)^m(1-p_k^{\Delta m})}{1-p_k} \right] \right]}. \quad (2.25)$$

Таким образом, в соответствии с выражениями (2.15), (2.22), запишем результирующее выражение для определения вероятности передачи  $k$ -ым элементом сети  $\tau_k$  ( $k = 1 \dots n$ ) в случайно выбранном временном слоте:

$$\begin{aligned} \tau_k &= \sum_{i=0}^{m+\Delta m} b_{i,0} = \sum_{i=0}^{m+\Delta m} p_k^i b_{0,0} = \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} b_{0,0} = \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} \cdot \\ &\cdot \frac{2}{\frac{2q_k}{1-q_k} + \frac{1-p_k^{m+\Delta m+1}}{1-p_k} + W_0 \left[ \frac{1-(2p_k)^{m+1}}{1-2p_k} + \frac{p_k(2p_k)^m(1-p_k^{\Delta m})}{1-p_k} \right]} = \\ &= \frac{2(1-p_k^{m+\Delta m+1})}{\frac{2q_k(1-p_k)}{1-q_k} + (1-p_k^{m+\Delta m+1}) + W_0 \left[ \frac{[1-(2p_k)^{m+1}](1-p_k)}{1-2p_k} + p_k(2p_k)^m(1-p_k^{\Delta m}) \right]}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

В соответствии с (2.26) вероятность передачи  $k$ -ым элементом сети  $\tau_k$  зависит от вероятности неудачной передачи  $p_k$ , которая в свою очередь, зависит от вероятности коллизий  $p_c$  и вероятности повреждения кадра помехой  $p_f$ . Вероятность  $p_f$  была рассмотрена ранее и определяется в соответствии с выражением (2.12). Для определения вероятности коллизий  $p_c$  рассмотрим два частных случая:

- первый случай, – когда сеть состоит из статистически однородных станций, то есть станций, в очередь каждой из которых поступает пуассоновский поток пакетов с одинаковой интенсивностью  $\lambda$ ;

- второй случай, – когда сеть состоит из статистически неоднородных станций, то есть станций, в очередь каждой из которых поступает пуассоновский поток пакетов с произвольной интенсивностью  $\lambda_k$ , где  $k = 1 \dots n$  (очевидно, что данный случай является более общим и включает в себя первый случай).

Тогда для первого случая, вероятность коллизий  $p_c$  будет одинакова для всех станций сети и может быть определена в соответствии со следующим выражением:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (2.27)$$

Во втором случае, вероятность коллизий  $p_{c_k}$  для элемента сети  $k$  ( $k = 1 \dots n$ ) указывает на вероятность того, что, по крайней мере, один из  $n - 1$  оставшихся элементов сети может вести передачу в том же временном слоте, что и элемент сети  $k$ . В соответствии с этим вероятность  $p_{c_k}$  может быть рассчитана как:

$$p_{c_k} = 1 - \prod_{i=1, i \neq k}^n (1 - \tau_i). \quad (2.28)$$

Выражения (2.13), (2.26) и (2.28) образуют систему нелинейных уравнений с неизвестными переменными  $\tau_k$  и  $p_{c_k}$ , при известном  $q_k$ . Данная система уравнений может быть решена известными численными методами.

Следует отметить, что при  $p_f = 0$ ,  $q_k = 0$ ,  $\Delta m \rightarrow \infty$ , то есть при условии идеального канала (отсутствуют ошибки в кадрах), при условии постоянного наличия в буфере элемента сети пакета готового для передачи и при неограниченном количестве дополнительных повторных передач, разработанная аналитическая модель, учитывающая оба состояния канала, вырождается в случай с насыщенным состоянием.

На основании полученных аналитических выражений для вероятностей  $\tau_k$  и  $p_c$  проведем анализ пропускной способности и скорости обработки пакетов элементом сети в ненасыщенном состоянии, с использованием среднего значения виртуального времени передачи  $T_v$ .



Пусть  $P_{tr}$  вероятность того, что, по крайней мере, один элемент сети производит передачу данных в данном тайм-слоте. Поскольку  $n$  элементов сети конкурируют за доступ к среде передачи и каждый элемент сети ведёт передачу с вероятностью  $\tau_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), то значение  $P_{tr}$  может быть рассчитано как:

$$P_{tr} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tau_i). \quad (2.29)$$

Пусть  $P_s$  вероятность того, что произведена успешная передача, которая рассчитывается как отношение между вероятностью передачи во временном интервале одним элементом сети, в зависимости от вероятности того, что по крайней мере один элемент сети передает в том же временном интервале. Следовательно, получим:

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \prod_{j=1, j \neq i}^n (1 - \tau_j)}{P_{tr}}. \quad (2.30)$$

Теперь определим средние продолжительности всех типов виртуальных слотов для базового и RTS/CTS механизмов доступа.

Пусть:

-  $T_s$  – среднее время занятости канала при успешной передаче пакета (длительность "успешного" слота);

-  $T_c$  – среднее время занятости канала из-за неудачной передачи пакетов, вызванной коллизией (длительность "коллизийного" слота);

-  $T_e$  – среднее время занятости канала из-за возникновения ошибки в кадре, в результате его искажения помехой (длительность "ошибочного" слота);

-  $T_\sigma$  – среднее время, когда ни одна из станций не ведёт передачу (длительность "пустого" слота);

-  $T_v$  – среднее время между двумя последовательными успешными передачами пакетов элементов сети  $k$ .

Предположим, что содержимое преамбулы или заголовка кадра всегда успешно принимается элементами сети, и ошибки кадра могут возникать только в оставшейся его части. Данное предположение может быть обосновано тем, что

скорость передачи преамбул на практике гораздо ниже скорости передачи полезной информации. Из этого следует, что  $T_e = T_c$ . Значения  $T_s$ ,  $T_c$  и  $T_e$  зависят от реализации механизма доступа (базовый или RTS/CTS), исходя из этого, их можно вычислить следующим образом [102, 103]:

Для базовой реализации механизма доступа:

$$T_s = T_{DIFS} + T_{wait} + T_{SIFS} + T_{data} + T_{ACK} + T_{\sigma},$$

$$T_c = T_e = T_{EIFS} + T_{wait} + T_{data} + T_{\sigma}.$$

Для механизма доступа RTS/CTS:

$$T_s = T_{DIFS} + T_{wait} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{data} + T_{ACK} + T_{\sigma},$$

$$T_c = T_e = T_{EIFS} + T_{wait} + T_{RTS} + T_{\sigma},$$

$$T_{wait} = MAC_{hdr} + PHY_{hdr}.$$

где  $T_{DIFS}$  – интервал времени DIFS,  $T_{EIFS}$  – интервал времени EIFS,  $T_{wait} = MAC_{hdr} + PHY_{hdr}$  – интервал времени, отводимый на передачу заголовков кадров на MAC и PHY-уровнях,  $T_{RTS}$  – время передачи кадра RTS,  $T_{SIFS}$  – интервал времени SIFS,  $T_{CTS}$  – время передачи кадра CTS,  $T_{data}$  – время передачи кадра данных,  $T_{ACK}$  – время передачи кадра ACK.

Графическая интерпретация длительностей виртуальных слотов и виртуального времени передачи кадра (пакета) представлена на рисунке 2.7.

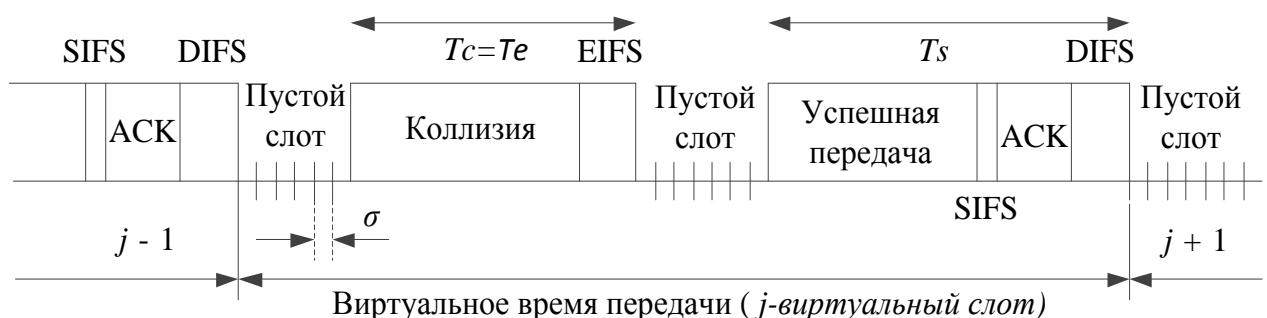


Рисунок 2.7 – Графическая интерпретация длительностей виртуальных слотов и виртуального времени передачи кадра (пакета)

Стоит отметить, что средняя длина временного интервала между двумя последовательными успешными передачами  $E(T_v)$  зависит от вероятности того,

что имеется, по крайней мере, одна станция, которая имеет пакет готовый к передаче. Следовательно:

$$E(T_v) = (1 - P_{tr})T_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_sP_fT_e. \quad (2.31)$$

Средняя временная задержка пакета, связанная с его обслуживанием элементом сети  $k$  на МАС-уровне, определяется от момента достижения пакетом начала очереди данного элемента и до момента его успешной передачи из очереди и получения кадра подтверждения АСК. Средняя временная задержка пакета может быть определена как произведение средней длительности слота на среднее число слотов до завершения передачи пакета. Необходимо отметить, что средняя временная задержка пакета определяет среднюю скорость обработки пакетов  $\mu_k$  элементом сети  $k$ . При этом если пакет будет отброшен, по причине превышения указанного предельного количества попыток передачи, то время обработки этого пакета не будет учитываться в расчёте среднего времени обработки пакетов.

Каждая неудачная передача вызывает расширение окна конкуренции, до тех пор, пока оно не достигнет максимального значения, таким образом, среднее количество тайм-слотов  $E(X_k)$ , необходимых для успешной передачи пакета элементом сети  $k$  может быть определено следующим выражением:

$$\begin{aligned} E(X_k) &= \sum_{i=0}^{m+\Delta m} \left[ (1 - p_k) p_k^i \frac{W_i + 1}{2} \right] = \\ &= \frac{1 - p_k}{2} \sum_{i=0}^{m+\Delta m} p_k^i + \frac{W_0 (1 - p_k)}{2} \sum_{i=0}^m (2p_k)^i + \frac{2^m W_0 (1 - p_k)}{2} \sum_{i=0}^{\Delta m} p_k^{m+i} = \\ &= \frac{1 - p_k^{m+\Delta m+1}}{2} + \frac{W_0 (1 - p_k) [1 - (2p_k)^{m+\Delta m+1}]}{2(1 - 2p_k)} + 2^{m-1} W_0 \cdot p_k^m (1 - p_k^{\Delta m+1}). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Таким образом, средняя скорость обработки пакетов  $\mu_k$  элементом сети  $k$  может быть определена как:

$$\mu_k = E(X_k)E(T_v), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.33)$$

Очевидно, что выражения (2.11), (2.13), (2.26), (2.28), (2.31) и (2.33) образуют систему нелинейных уравнений с неизвестными переменными  $\tau_k$  и  $p_c$ . Данная система уравнений может быть решена известными численными методами.

Теперь можно определить пропускную способность сети в условиях ненасыщенного состояния ее элементов. Тогда, нормированная пропускная способность канала может быть представлена в виде отношения средней полезной нагрузки передаваемой информации во временном интервале к средней длине этого временного интервала. Следовательно, ожидаемая пропускная способность ненасыщенного канала  $C_u$  может быть вычислена следующим способом:

$$C_u = \frac{E[L_p](1 - \prod_{i=1}^n q_i)P_{tr}P_s}{(1 - P_{tr})t_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e}, \quad (2.34)$$

где  $E[L_p]$  – средняя длина пакета.

Одним из состояний описываемых разработанной моделью является насыщенное состояние пропускной способности сети. Данное состояние достигается при  $q_k = 0$  для всех элементов сети. В насыщенном состоянии элементы сети постоянно конкурируют за получение доступа к каналу. Если сделать допущение, что вероятность возникновения коллизий для каждого пакета одинакова, то ожидаемая пропускная способность насыщенного канала  $C_s$  может быть рассчитана как:

$$C_s = \frac{E[L_p]P_{tr}P_s}{(1 - P_{tr})t_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e}. \quad (2.35)$$

Очевидно, что имея аналитические выражения для двух состояний сети (насыщенное и ненасыщенное) возможно осуществлять расчет остаточной пропускной способности, с целью дальнейшего эффективного использования ее для обслуживания новых заявок, поступающих от элементов беспроводной сети.

Таким образом, в данном разделе был проведен синтез аналитической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале. Оценка адекватности (верификация) разработанной модели, будет проведена путем сравнения полученных с помощью неё численных результатов с результатами

имитационного моделирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11. Результаты имитационного моделирования подробно будут рассмотрены в главе 5. В рамках данной главы на базе разработанной аналитической модели проведем исследование зависимостей показателей производительности беспроводной сети от основных параметров протокола IEEE 802.11.

## **2.5 Оценка производительности беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, функционирующей в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале**

На основе разработанной аналитической модели проведем исследование влияния параметров трафика (интенсивность нагрузки –  $\lambda/\mu$ ), конфигурации беспроводной сети (количество элементов в сети –  $n$ ), интенсивности помех (вероятность битовой ошибки –  $BER$ ), длины пакета  $L_p$  и параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 (размер минимального окна конкуренции –  $W_0$ , количество повторных попыток передач пакета –  $m$ ) на показатели производительности беспроводной сети. В качестве основного показателя производительности беспроводной сети выберем ее пропускную способность. По результатам анализа осуществим постановку задачи на разработку алгоритма настройки управляемых параметров канального уровня (за счет поиска их оптимальных значений) стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети.

Исследования проводились для беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b<sup>5</sup>, архитектуры "Hot-spot". Скорость передачи данных в радиоканале была выбрана равной 11 Мбит/с. Основные параметры протокола IEEE 802.11b, используемые при проведении моделирования, приведены в таблице 2.1.

---

<sup>5</sup> Стандарт IEEE 802.11b был выбран в качестве примера, т.к. оборудование именно этого стандарта нашло наибольшее применение (и применяется до настоящего времени) в технологических сетях распределенных систем управления, например в сетях ГТП.

Таблица 2.1 – Параметры протокола IEEE 802.11b, используемые при проведении моделирования

Наименование параметра	Значение
RTS	44 байта
CTS	38 байт
ACK	38 байт
SIFS	10 мкс
DIFS	50 мкс
EIFS	212 мкс
MAC-заголовок	28 байт
PHY-заголовок	24 байта
Размер пакета	Выбирался равновероятно из множества значений $\{1, \dots, 2300\}$ , байта
Временной интервал (тайм-слот $\sigma$ )	20 мкс
Количество повторных попыток передачи пакета, $m$	6 (рекомендован стандартом IEEE 802.11 для схемы DSSS)
Размер минимального окна конкуренции, $W_0$	16 (рекомендован стандартом IEEE 802.11 для схемы DSSS)
Максимально допустимый размер окна конкуренции, $W_{\max}$	1024
Скорость канала номинальная	11 Мбит/с

Исследования проводились как для базового механизма доступа, так и для механизма RTS/CTS. Численные данные и их графические зависимости были получены с помощью системы компьютерной математики MathCad.

На рисунке 2.8 представлены зависимости пропускной способности  $C$  беспроводной сети от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  ((a) и (a1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно). Данные зависимости показывают, что с увеличением интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  пропускная способность сначала медленно растет, что соответствует ненасыщенному режиму функционирования сети, затем после некоторого достаточно крутого переходного периода, который соответствует режиму перехода из ненасыщенного состояния в насыщенное и длительность которого существенно зависит от числа станций в сети, происходит стабилизация пропускной способности на некоторых максимальных значениях, что соответствует режиму насыщения сети. Характер зависимостей для базового

и RTS/CTS механизмов доступа схож, при этом базовый механизм обеспечивает большие значения пропускной способности, чем механизм RTS/CTS, но разница уменьшается с ростом числа станций в сети. Такое поведение зависимостей вполне логично обосновывается наличием в механизме RTS/CTS накладных расходов в виде кадров RTS, CTS и соответственно межкадровых интервалов SIFS.

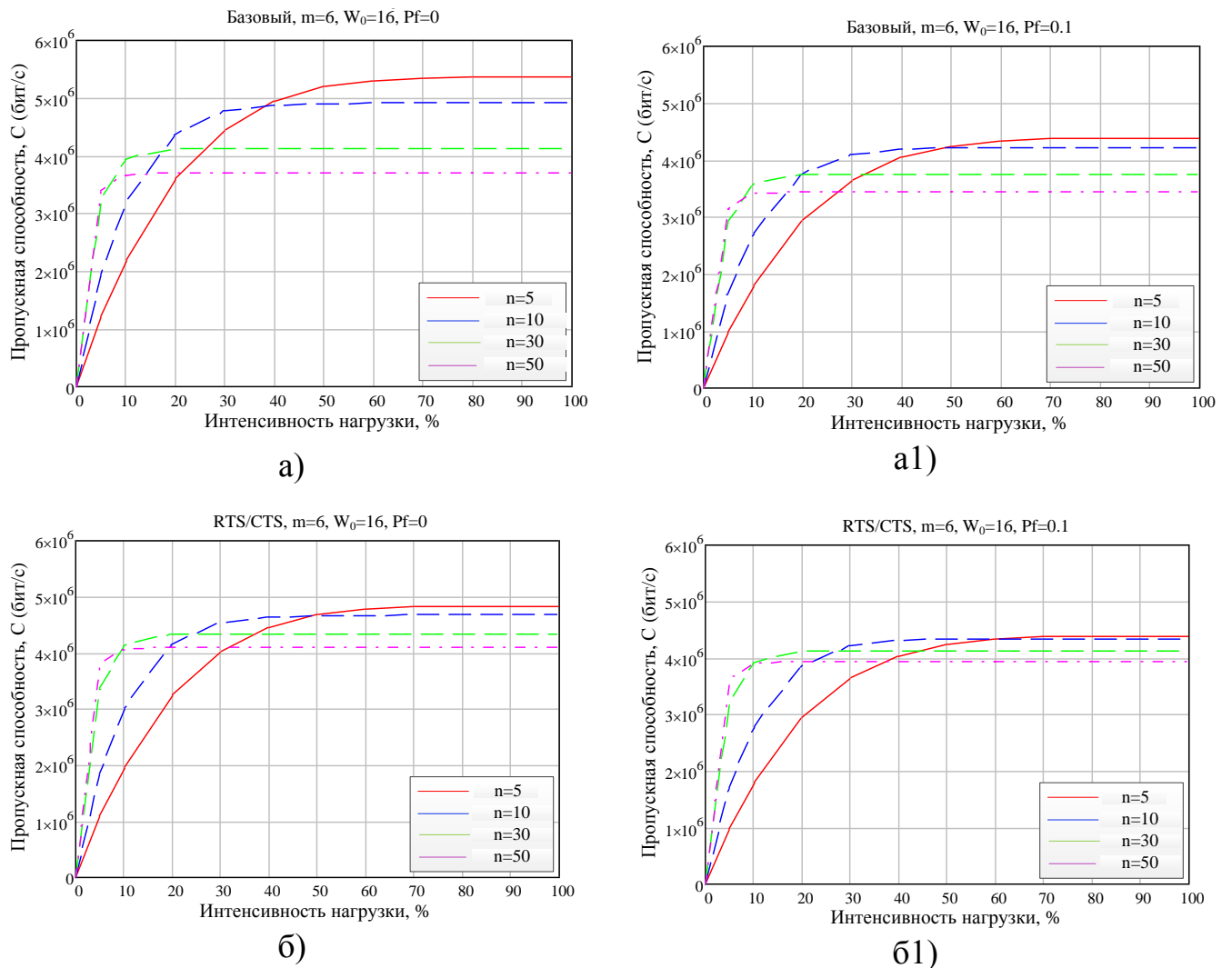


Рисунок 2.8 – Зависимость пропускной способности беспроводной сети от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)

Зависимости (а1) и (б1) показывают снижение значений пропускной способности для канала с аддитивным гауссовым шумом. При этом базовый режим является более чувствительным к воздействию помех, нежели режим

RTS/CTS, что имеет логическое объяснение: служебные кадры RTS и CTS имеют малую длину и передаются на физическом уровне со значительно меньшей скоростью, чем информационные, следовательно, вероятность повреждения данных кадров помехами значительно ниже, нежели вероятность повреждения информационных (DATA) кадров; при этом длительности "коллизийного" ( $T_c$ ) и "ошибочного" ( $T_e$ ) виртуальных слотов в режиме RTS/CTS значительно ниже (так как коллизия может быть только между пакетами RTS/CTS разных станций), нежели в базовом режиме. Отметим, что здесь и далее зависимости получены для фиксированного значения вероятности повреждения кадра помехой  $p_f = 0.1$ , что соответствует значению  $BER \approx 5 \cdot 10^{-5}$  при средней длине кадра  $L_p = 500$  байт. Очевидно, что зависимости могут быть получены и для других, произвольных значений  $BER$  и  $L_p$ .

На рисунке 2.9 представлены зависимости пропускной способности  $C$  беспроводной сети от количества станций в сети  $n$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно).

Данные зависимости показывают, что:

- при небольшом количестве станций в сети  $n$  и небольшой интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ , пропускная способность резко возрастает с увеличением числа станций и при определенном значении  $n$  достигает своего максимального значения;

- при дальнейшем увеличении числа станций в сети пропускная способность сети снижается; при этом для базового механизма доступа скорость снижения выше, нежели для механизма RTS/CTS; при небольшой интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ , пропускная способность для RTS/CTS режима практически стабилизируется с ростом числа станций в сети  $n$ ;

- зависимости (а1) и (б1) показывают снижение значений пропускной способности для канала с аддитивным гауссовым шумом;



- в условиях идеального канала применение базового механизма доступа дает выигрыш по пропускной способности при небольшом числе станций. При числе станций более 20 выгодным становится применение RTS/CTS режима.

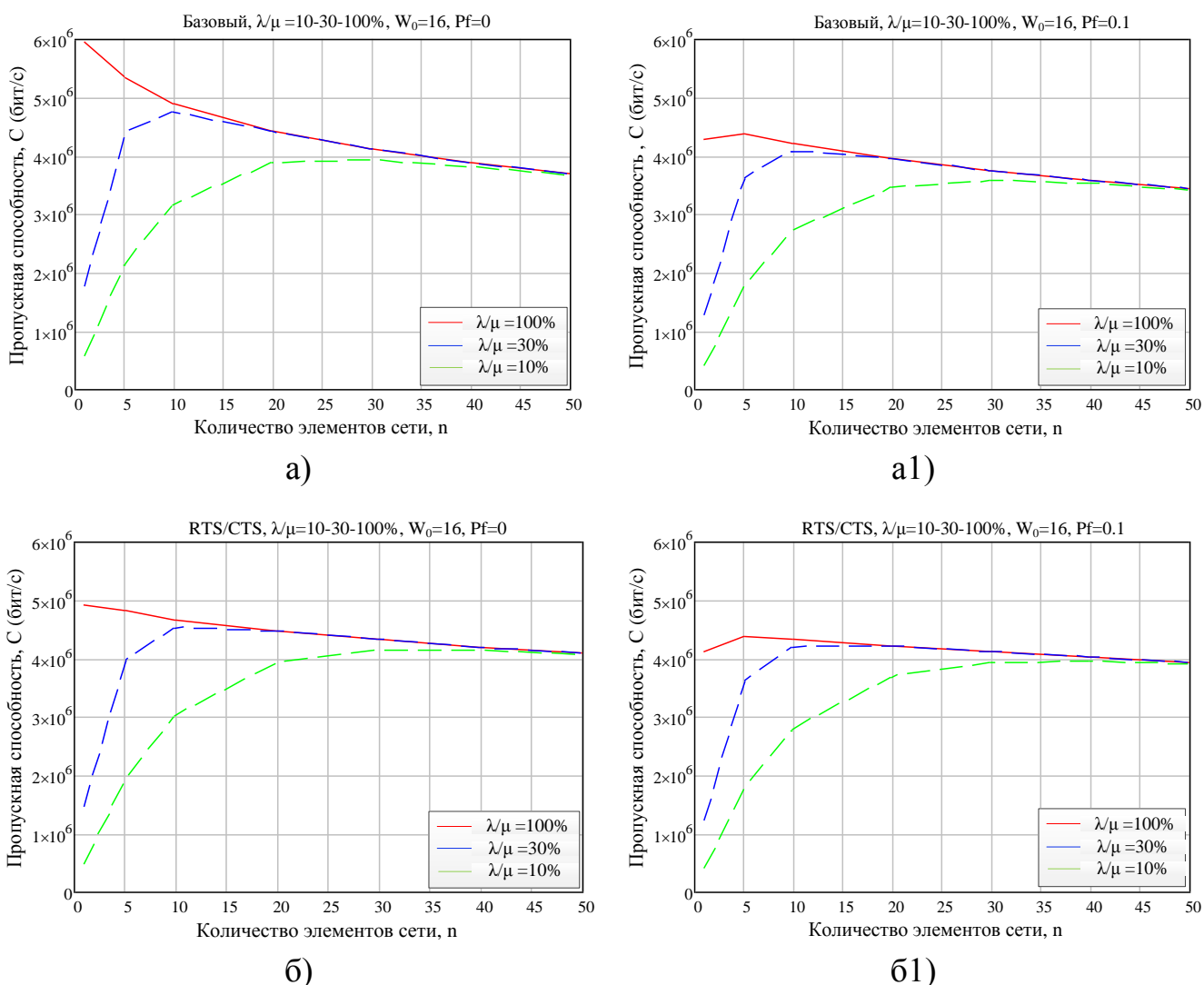


Рисунок 2.9 – Зависимость пропускной способности беспроводной сети от количества станций в сети  $n$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)

Примечательным является тот факт, что в условиях канала с помехами применение базового механизма доступа дает незначительный выигрыш по пропускной способности при небольшом числе станций (до 5 станций). При числе станций более 5 выгодным становится применение RTS/CTS режима.

На рисунке 2.10 представлены зависимости пропускной способности  $C$  беспроводной сети от вероятности передачи  $\tau$  элементом сети в начале тайм-слота ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно).

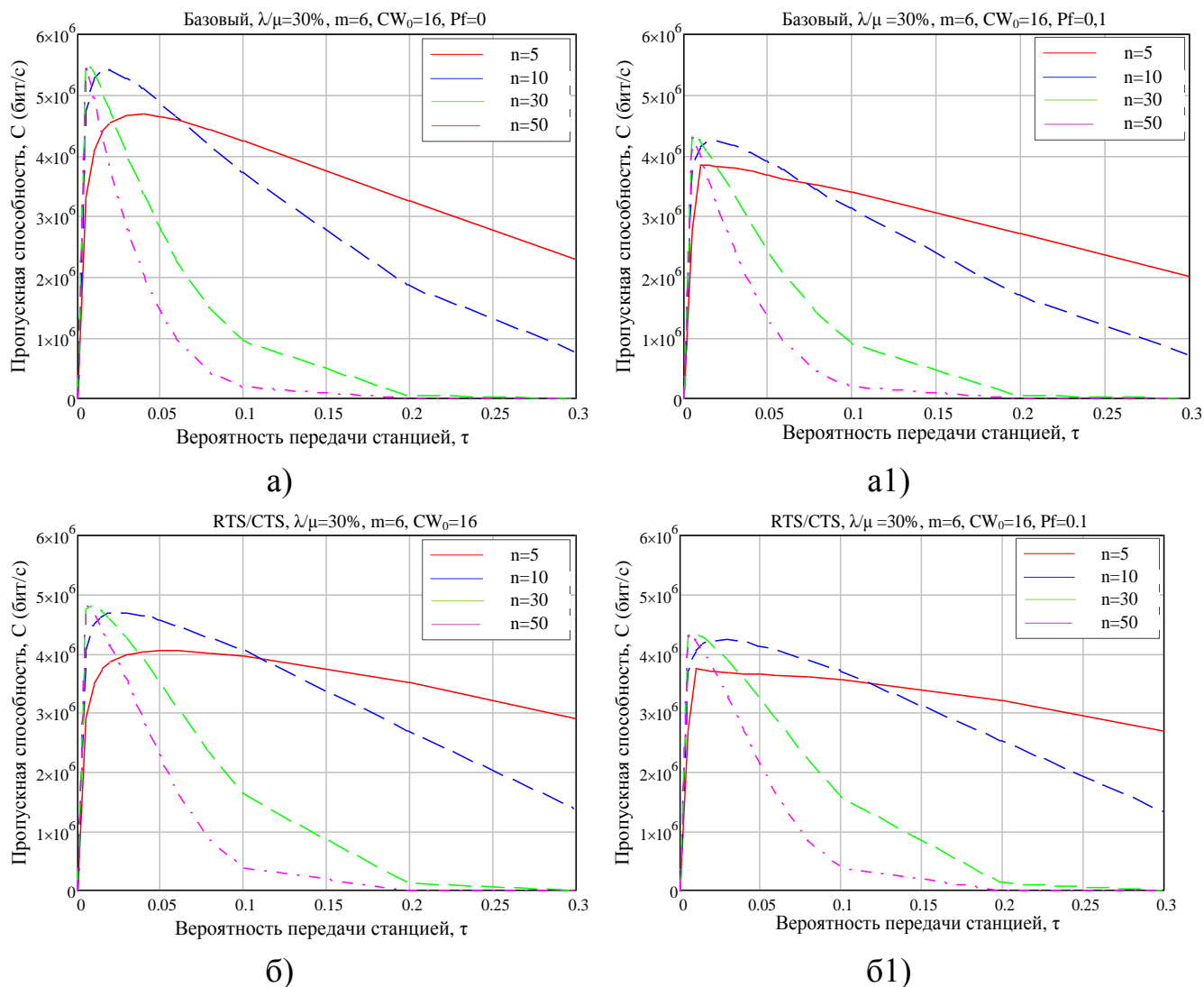


Рисунок 2.10 – Зависимость пропускной способности от вероятности передачи  $\tau$  элементом сети ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)

Данные зависимости показывают, что:

- поведение зависимости носит немонотонный характер, как для базового механизма, так и для механизма RTS/CTS;
- имеется оптимальное значение вероятности передачи  $\tau$ , при котором обеспечивается максимальное значение пропускной способности;
- для канала с аддитивным гауссовым шумом, при одинаковых значениях вероятности передачи  $\tau$ , наблюдается снижение значений пропускной способности.

Учитывая тот факт, что вероятность передачи  $\tau$  зависит от параметров  $W_0$  и  $m$  (согласно выражению (2.26)), то необходим более детальный анализ зависимости пропускной способности от каждого из этих параметров в отдельности.

На рисунке 2.11 представлены зависимости пропускной способности  $C$  беспроводной сети от минимального размера окна конкуренции  $W_0$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно).

На рисунке 2.12 представлены зависимости пропускной способности  $C$  от  $W_0$  при различных значениях интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ .

Данные зависимости показывают, что:

- поведение зависимости носит немонотонный характер, как для базового механизма, так и для механизма RTS/CTS;
- имеется оптимальное значение минимального размера окна конкуренции  $W_0$ , при котором обеспечивается максимальное значение пропускной способности;
- оптимальное значение  $W_0$  практически не зависит от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ . При этом с увеличением значения  $\lambda/\mu$  пропускная способность сети стремится к некоторому максимальному значению вне зависимости от количества станций в сети;

- оптимальное значение  $W_0$  зависит от вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$ , то есть зависит от помеховой обстановки, в которой функционирует беспроводная сеть;

- для канала с аддитивным гауссовым шумом наблюдается снижение значений пропускной способности.

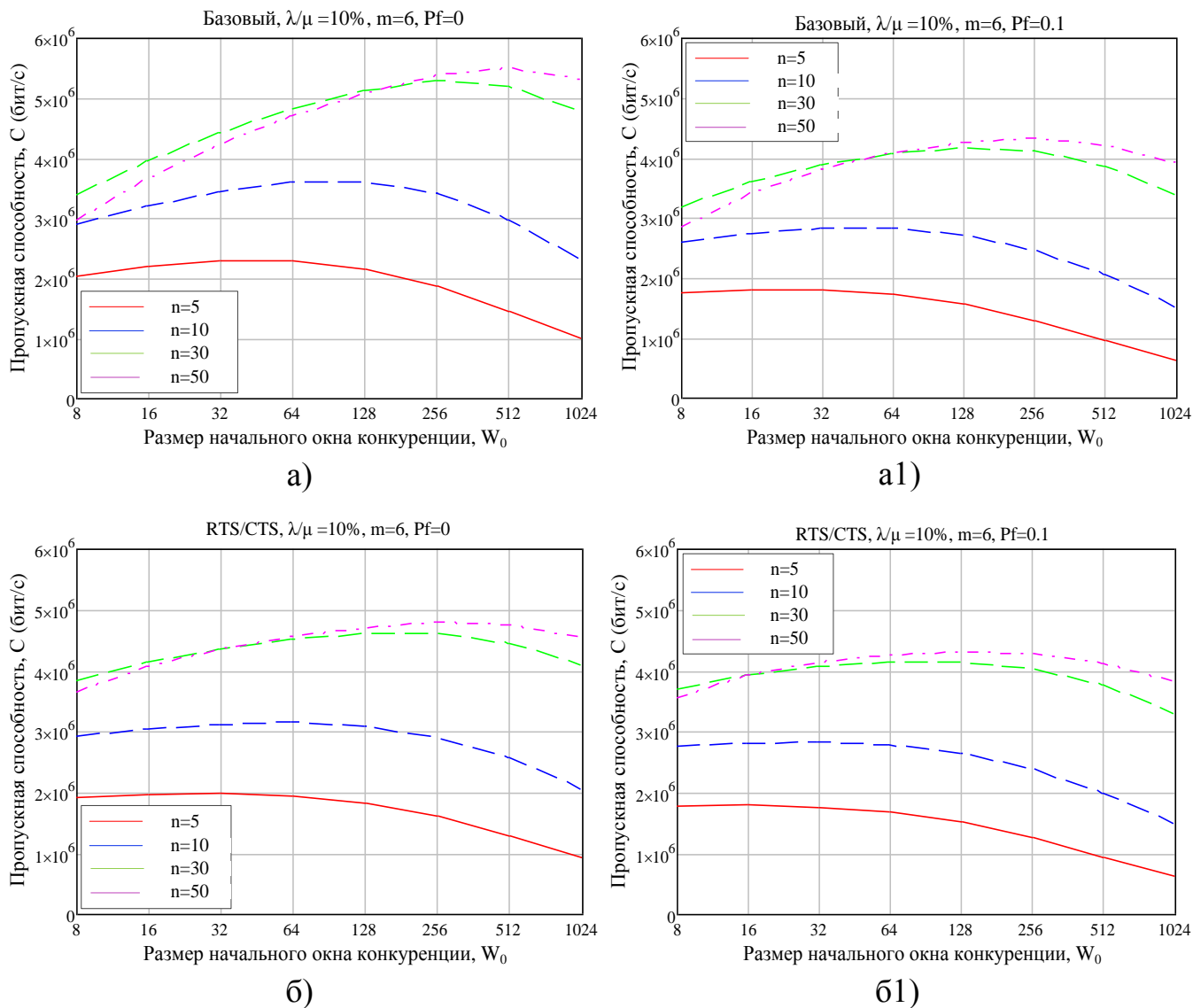
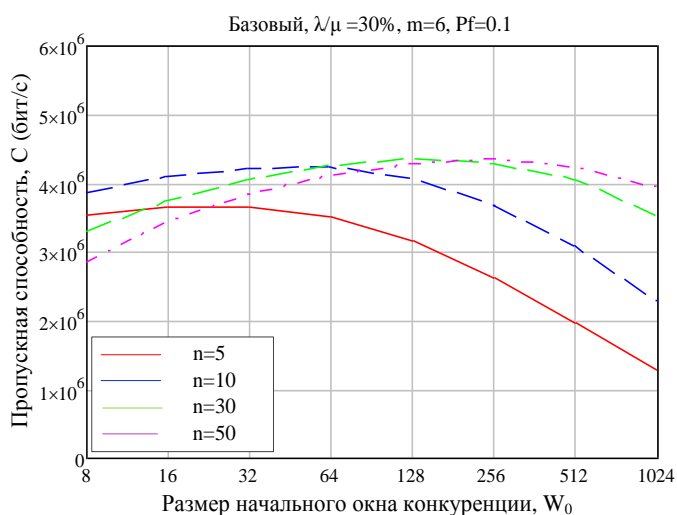
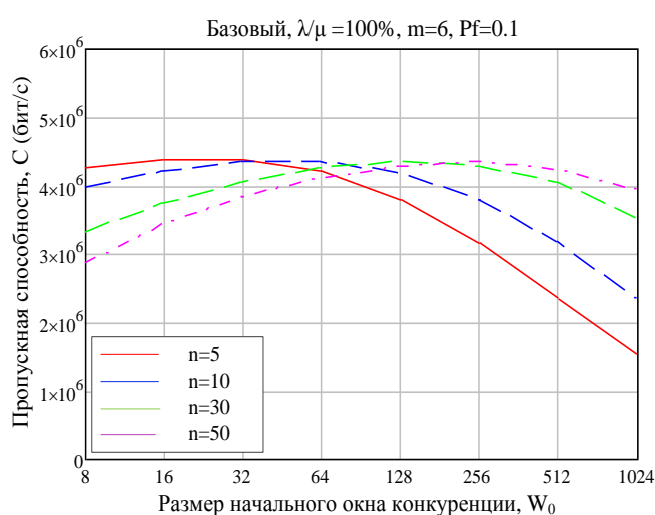


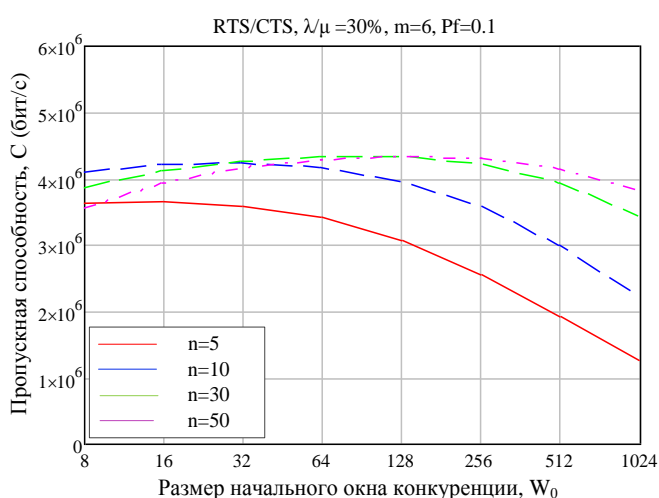
Рисунок 2.11 – Зависимость пропускной способности от минимального размера окна конкуренции  $W_0$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)



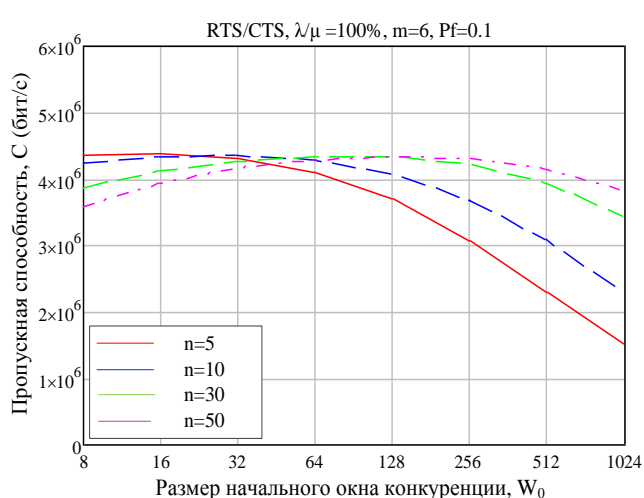
а)



а1)



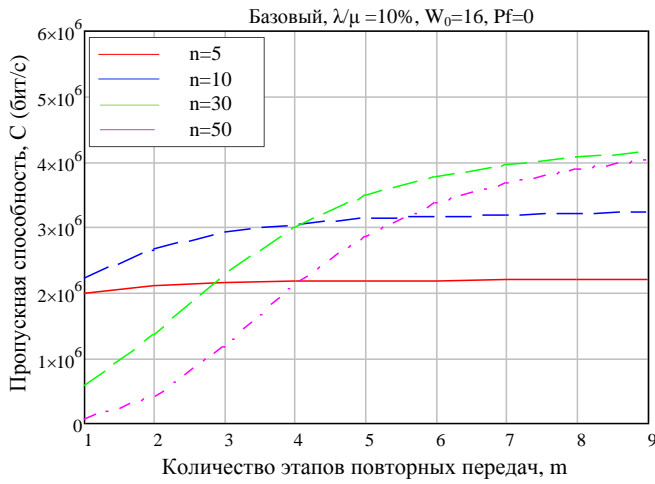
б)



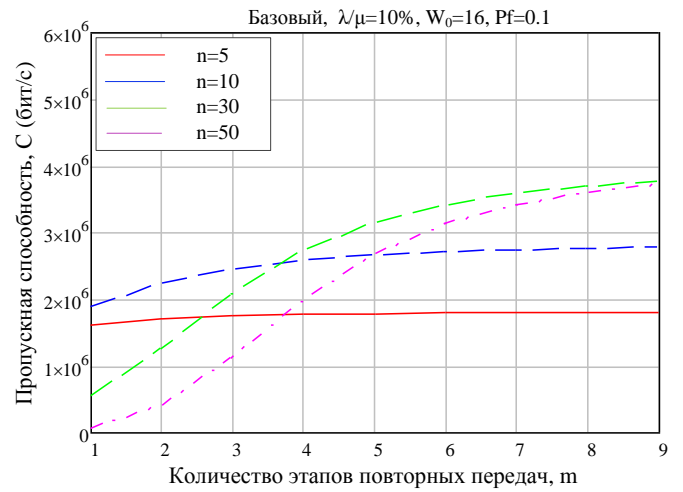
б1)

Рисунок 2.12 – Зависимость пропускной способности от  $W_0$  при наличии помех, для различных значений интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS)

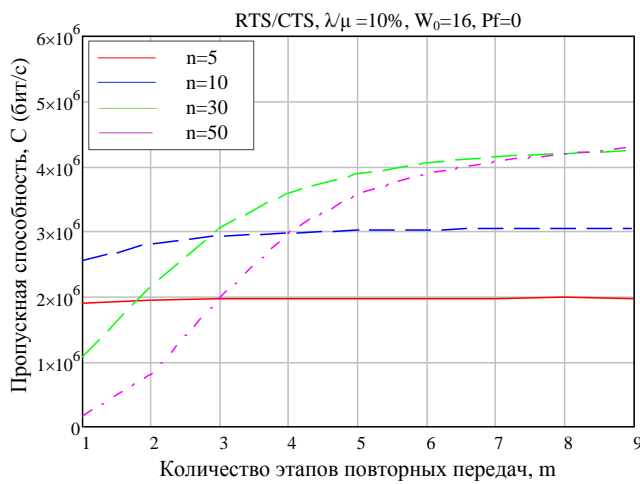
На рисунке 2.13 представлены зависимости пропускной способности  $C$  беспроводной сети от количества попыток передачи пакета  $m$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно). На рисунке 2.14 представлены зависимости  $C$  от  $m$  при различных значениях интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ .



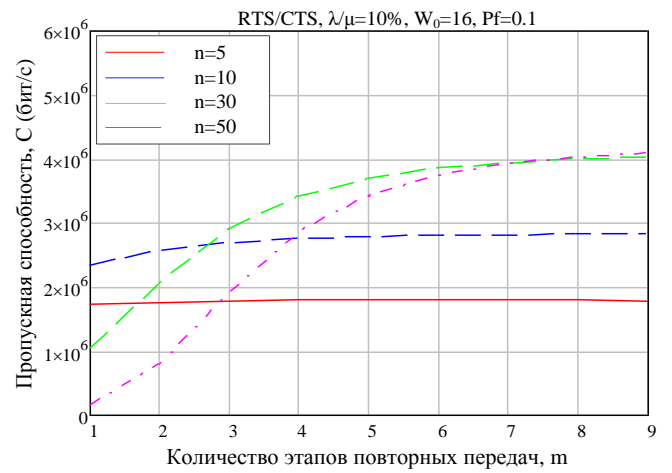
а)



а1)

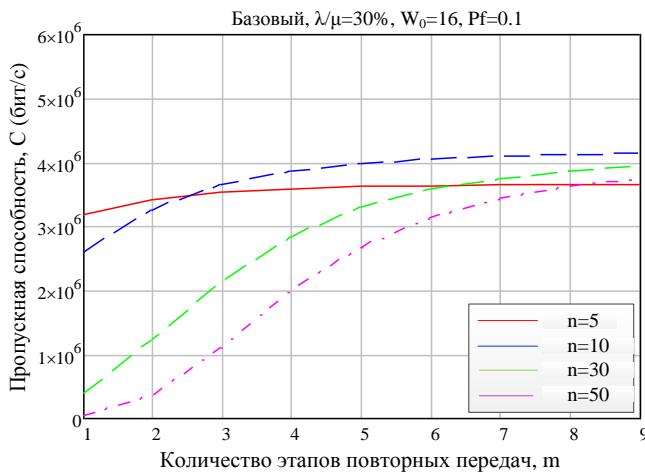


б)

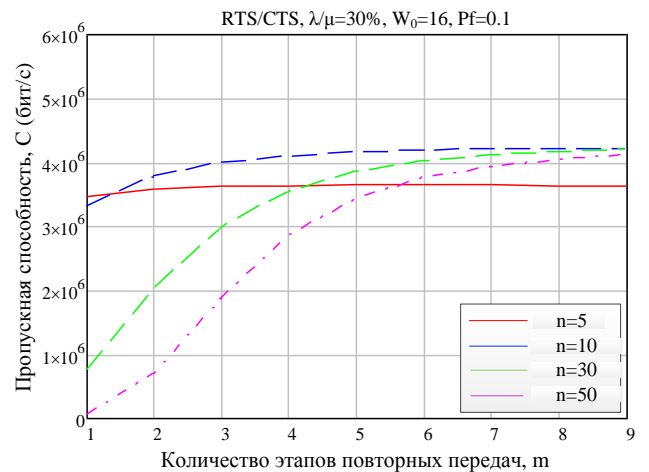


б1)

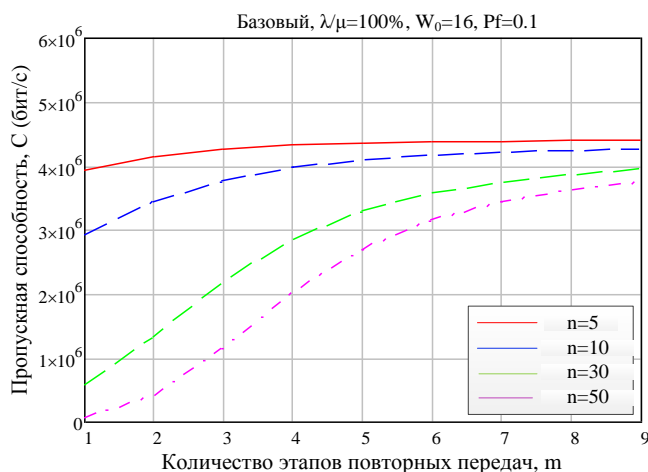
Рисунок 2.13 – Зависимость пропускной способности от количества попыток передачи пакета  $m$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)



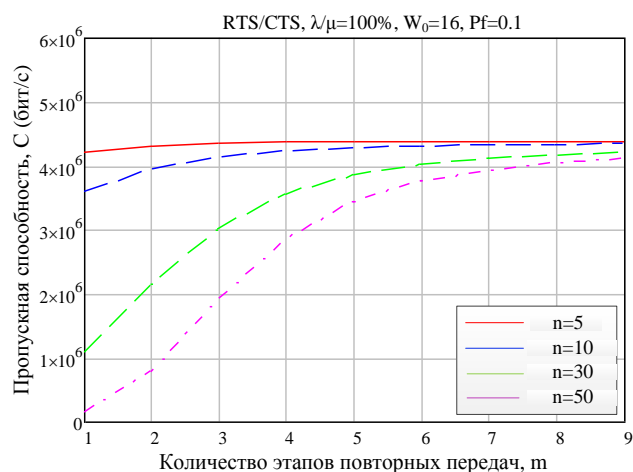
а)



а1)



б)



б1)

Рисунок 2.14 – Зависимость пропускной способности от  $m$  при наличии помех, для различных значений интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS)

Данные зависимости показывают, что:

- с увеличением  $m$  пропускная способность сети возрастает и существенно зависит от количества станций в сети;

- после достижения  $m$  некоторого значения, его дальнейшее увеличение не дает существенного прироста пропускной способности, за исключением небольшого прироста пропускной способности при увеличении  $m$  для базового механизма доступа и при большом количестве станций в сети, то есть имеется некоторое рациональное значение  $m$ , при котором обеспечивается близкое к максимальному значение пропускной способности, при приемлемом количестве  $m$ ; при этом увеличение параметра  $m$  существенно влияет (приводит к увеличению) на общее время задержки пакета на MAC-уровне;

- рациональное значение  $m$  практически не зависит от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ , при этом с увеличением значения  $\lambda/\mu$  пропускная способность сети стремится к некоторому максимальному значению вне зависимости от количества станций в сети;

- для канала с аддитивным гауссовым шумом наблюдается снижение значений пропускной способности.

На рисунке 2.15 представлены зависимости пропускной способности  $C$  от размера передаваемого пакета  $L_p$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно). Данные зависимости показывают, что:

- с увеличением длины пакета пропускная способность сети линейно возрастает и не существенно зависит от количества станций в сети при средней длине пакета до 600 байт;

- для канала с аддитивным гауссовым шумом характер зависимости сохраняется, но наблюдается снижение значений пропускной способности.

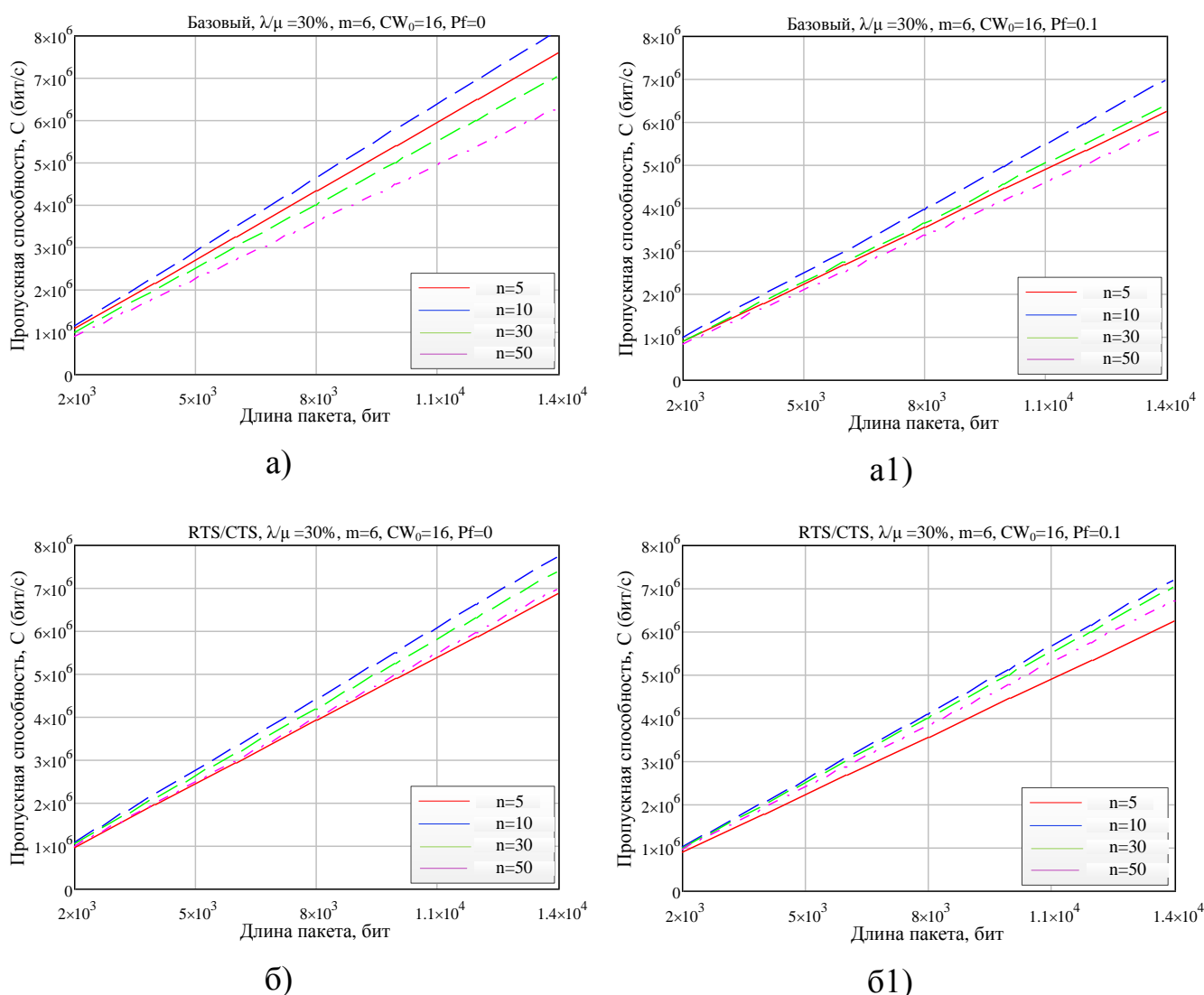


Рисунок 2.15 – Зависимость пропускной способности  $C$  от  $L_p$  ((а) и (а1) – для базового механизма доступа в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно; (б) и (б1) – для механизма RTS/CTS в условиях идеального канала и при наличии помех соответственно)



На рисунке 2.16 представлены зависимости пропускной способности  $C$  от вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$  при различных значениях интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$ . Данные зависимости показывают, что с увеличением вероятности  $p_f$  пропускная способность сети монотонно падает, при этом с увеличением количества станций в сети данная зависимость становится не существенной как для базового механизма доступа, так и для механизма RTS/CTS, что можно объяснить снижением степени влияния вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$  на пропускную способность, в сравнении с вероятностью возникновения коллизий  $p_c$  (с ростом числа станций  $n$  возрастает и вероятность коллизий в сети  $p_c$ ).

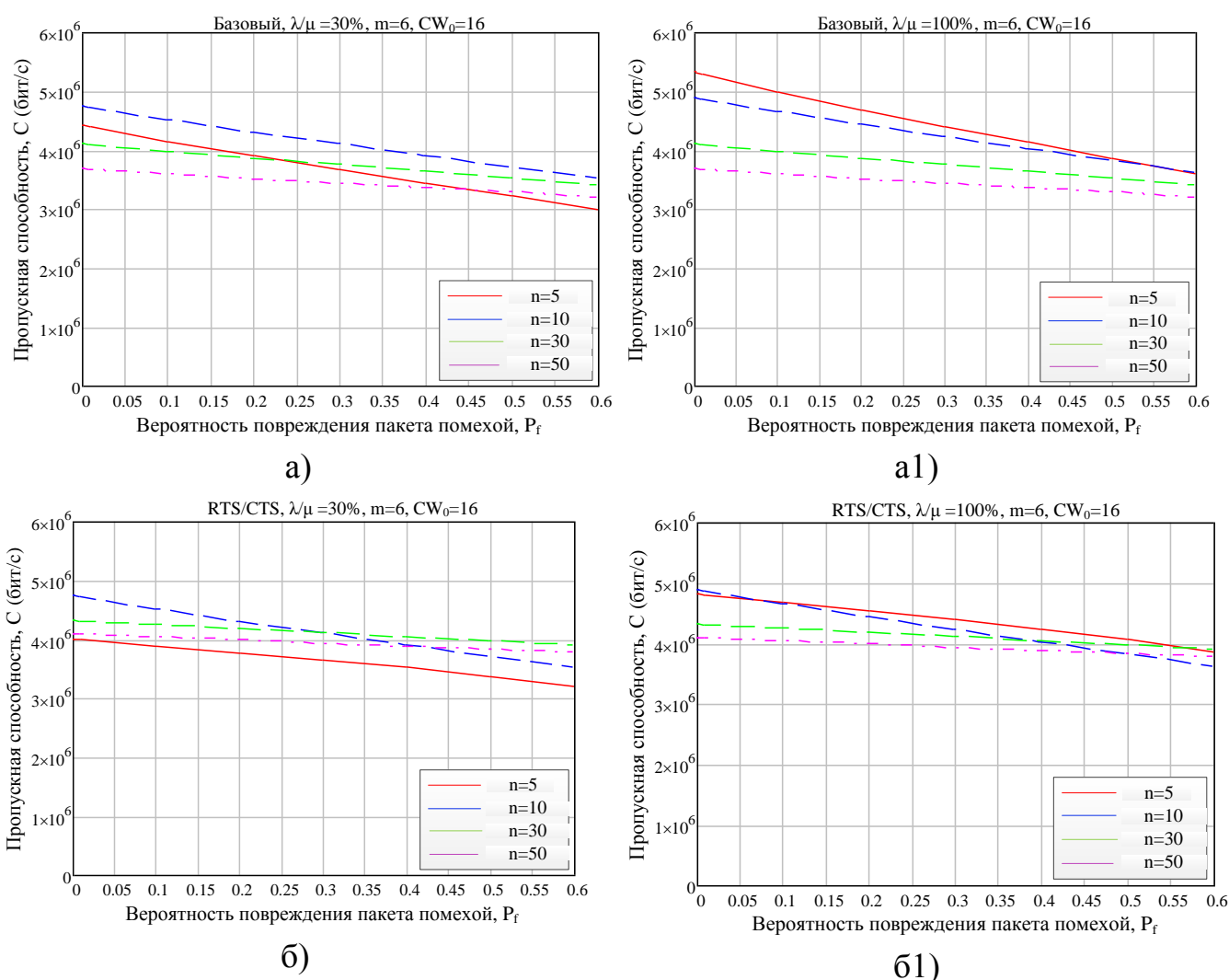


Рисунок 2.16 – Зависимость пропускной способности  $C$  от вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$  при различных значениях интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$

На рисунке 2.17 представлены зависимости вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$  от вероятности битовой ошибки  $BER$  (а) и длины пакета  $L_p$  (б). Данные зависимости показывают, что с увеличением вероятности битовой ошибки  $BER$  (а) и длины пакета  $L_p$  (б) вероятность повреждения пакета помехой  $p_f$  монотонно возрастает, при этом имеется некоторое пороговое значение вероятности битовой ошибки  $BER$  (примерно  $10^{-5}$ ) начиная с которого, данная зависимость имеет резкий порогообразный возрастающий характер.

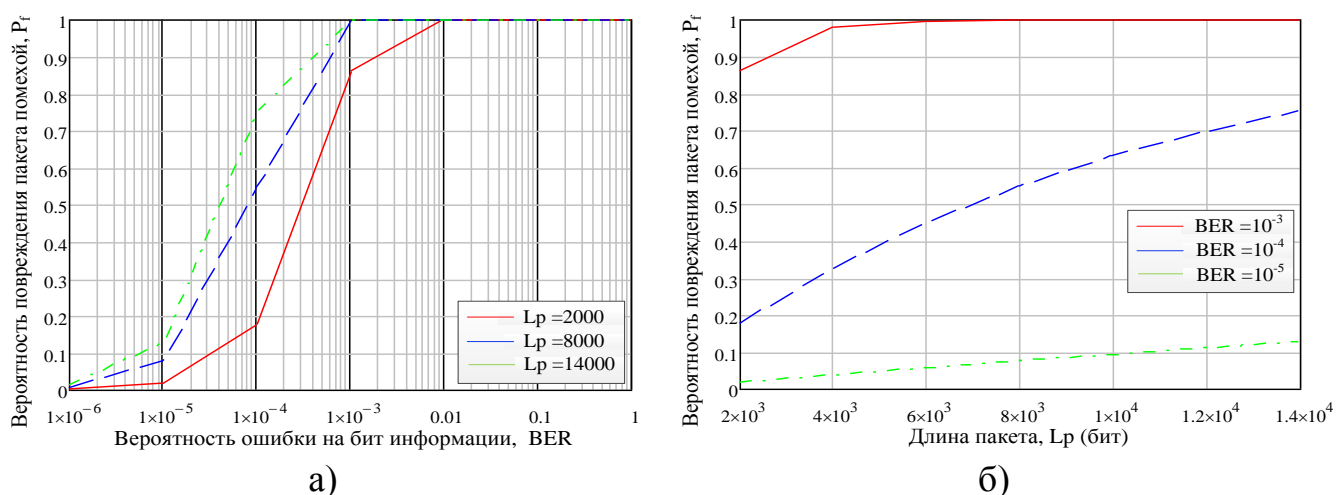


Рисунок 2.17 – Зависимость вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$  от вероятности битовой ошибки  $BER$  (а) и длины пакета  $L_p$  (б)

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить характерные зависимости пропускной способности беспроводной сети от параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11. Значимым является то факт, что поведение зависимости пропускной способности от изменения таких параметров канального уровня, как минимальный размер окна конкуренции  $W_0$  и количество попыток передач  $m$ , имеют различный характер (немонотонный и монотонный соответственно), как для базового механизма, так и для механизма RTS/CTS, при этом для заданной конфигурации сети имеются оптимальные значения  $W_0$  и  $m$ , при которых обеспечиваются максимальные значения пропускной способности.

Следовательно, актуальной является задача по разработке алгоритма настройки (за счет многомерной оптимизации) параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети.

### **Выводы по главе:**

1. В данной главе осуществлена разработка математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующейся на аппарате цепей Маркова и отличающейся от известных учётом состояния загруженности элементов сети (насыщенное и ненасыщенное состояние) и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех. Разработанная модель учитывает оба механизма обеспечения доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11: базовый (механизм без "квитирования") и RTS/CTS (механизм с "квитированием").

2. Для разработанной марковской модели получены в явном виде аналитические выражения для оценки пропускной способности сети, времени задержки передачи пакета, вероятности передачи и отказа в обслуживании (передачи) пакета. Данные выражения позволяют оценить производительность беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 функционирующих, как в насыщенном, так и ненасыщенном состояниях.

3. На основе разработанной аналитической модели было проведено исследование влияния параметров трафика, конфигурации беспроводной сети, интенсивности помех, длины пакета и настраиваемых параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 (размер минимального окна конкуренции –  $W_0$ , количество попыток повторных передач пакета –  $m$ ) на показатели производительности беспроводной сети. В качестве основного показателя производительности беспроводной сети была выбрана ее пропускную способность. Моделирование показало, что зависимость пропускной способности от изменения таких параметров канального уровня стандарта 802.11, как минимальный размер окна конкуренции  $W_0$  и количество попыток передач  $m$ , имеют различный характер (немонотонный и монотонный соответственно), как для базового механизма доступа, так и для механизма RTS/CTS. При этом для заданной конфигурации сети всегда имеются оптимальные значения  $W_0$  и  $m$ , при которых обеспечиваются максимальные значения пропускной способности. По результатам анализа была определена актуальность задачи по разработке алгоритма настройки управляемых параметров (путем поиска их оптимальных значений) канального уровня стандарта IEEE 802.11, обеспечивающих повышение пропускной способности сети.

### ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ

#### 3.1 Постановка задачи по разработке алгоритма

В главе 2 был проведен анализ зависимостей пропускной способности беспроводной сети от управляемых параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11. Показано, что поведение зависимостей пропускной способности от изменения таких параметров, как минимальный размер окна конкуренции  $W_0$  и количество попыток передач  $m$ , имеет различный характер (немонотонный и монотонный соответственно) как для базового механизма, так и для механизма RTS/CTS. При этом для заданной конфигурации сети имеются оптимальные значения  $W_0$  и  $m$ , при которых обеспечиваются максимальные значения пропускной способности. В связи с этим очевидна необходимость разработки механизма управления параметрами канального уровня стандарта IEEE 802.11. Целью управления параметрами  $W_0$  и  $m$  станций сети является поиск таких значений  $W_0'$  и  $m'$ , при которых обеспечиваются максимальные значения пропускной способности сети  $C$ , в соответствии со следующим условием [104]:

$$C \rightarrow \max_{m, W_0} . \quad (3.1)$$

Следовательно, актуальной является задача по разработке алгоритма настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети. При этом настройка параметров  $W_0$  и  $m$  может быть осуществлена путем поиска их оптимальных значений по критерию максимума пропускной способности сети при заданных условиях ее функционирования.

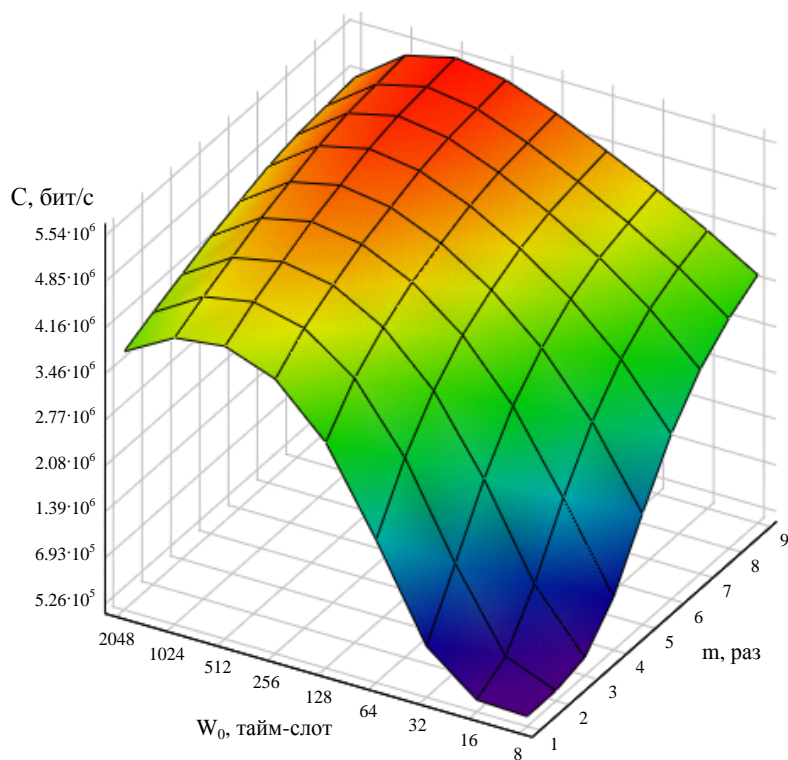
### 3.2 Обоснование критерия, метода и параметров оптимизации. Разработка блок-схемы алгоритма.

Ранее отмечалось, что пропускная способность беспроводной сети является одним из основных показателей, характеризующих эффективность функционирования сети в целом и качество обслуживания передаваемого в ней трафика (QoS) в частности. Максимизация пропускной способности беспроводной сети, за счет оптимизации параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11, позволит повысить эффективность функционирования сети [105]. Поэтому в качестве критерия оптимизации выбран максимум пропускной способности сети в соответствии с выражением (3.1).

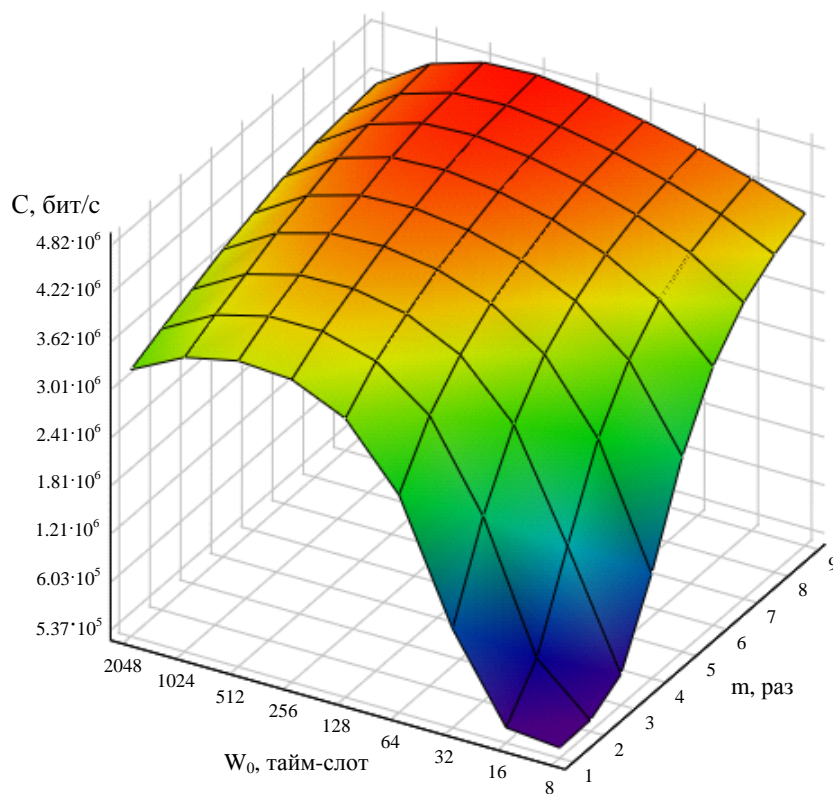
Пропускная способность  $C$  беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, определяемая выражением (2.34), при фиксированных значениях: количества станций в сети  $n$ , интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  и длины пакетов  $L_p$ , вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$ , характеризуется не одним, а областью значений и может быть представлена в виде следующего функционала (целевой функции):

$$C = F\{W_0, m, n, \lambda/\mu, L_p, p_f\}. \quad (3.2)$$

В соответствии с постановкой задачи (п. 3.1), в части касающейся разработки алгоритма настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, необходимо провести исследование трехмерной зависимости пропускной способности сети от параметров  $W_0$  и  $m$ . Результаты данного исследования, проведенные с использованием разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале (глава 2), представлены на рисунке 3.1. Трехмерные графические зависимости пропускной способности от параметров  $W_0$  и  $m$  построены как для базового механизма доступа, так и для механизма RTS/CTS, при фиксированных значениях  $n$ ,  $\lambda/\mu$ ,  $L_p$  и  $p_f$ .



а)



б)

Рисунок 3.1 – Область значений целевой функции, в зависимости от параметров  $W_0$  и  $m$  при фиксированных значениях  $n = 50$ ,  $\lambda/\mu = 30$ ,  $p_f = 0$  ((а) – для базового механизма доступа; (б) – для механизма RTS/CTS соответственно)

Как следует из рисунка 3.1, значения пропускной способности  $C$ , для различных наборов параметров  $W_0$  и  $m$ , являются нелинейной гладкой унимодальной функцией без разрывов. Сложный, нелинейный характер зависимости целевой функции от параметров  $W_0$  и  $m$  не позволяет однозначно определить направление поиска максимума целевой функции. Поэтому необходимо разработать алгоритм поиска оптимальных значений параметров  $W_0'$  и  $m'$ , при которых обеспечивается максимизация целевой функции, то есть максимизация пропускной способности беспроводной сети. Очевидно, что данный алгоритм должен решать оптимизационную задачу, которую можно сформулировать следующим образом:

$$C = F\{W_0, m, n, \lambda / \mu, L_p, p_f\} \rightarrow \max_{m, W_0} \left| \begin{array}{l} n = const, \lambda / \mu = const < \infty, L_p = const, \\ p_f = const, W_{max} < \infty, m_{max} < \infty. \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Дополнительно к поиску оптимальных значений  $W_0'$  и  $m'$ , при которых обеспечивается максимизация целевой функции, разрабатываемый алгоритм должен обеспечивать определение некоторых рациональных пороговых значений  $m'$ , при которых изменение критерия оптимальности (пропускной способности сети  $C$ ) с дальнейшим увеличением  $m$  не приводит к превышению некоторого порогового значения точности вычисления пропускной способности  $C_{np}^{\Delta}$ . Также разрабатываемый алгоритм должен обеспечивать:

- определение оптимального значения максимального размера окна конкуренции  $W'_{max}$  на основании найденного оптимального значения  $W_0'$  и рационального значения  $m'$ ;

- контроль выполнения условия:  $W_{max} \leq 2^{m'} \cdot W_0'$  (при поиске оптимальных значений  $W_0'$  и  $m'$ ), исключающего превышения заданного значения максимального размера окна конкуренции  $W_{max}$  (данный параметр в радиооборудовании стандарта IEEE 802.11 является настраиваемым и определяется, как правило, статистически, исходя из требований к максимальной задержке передаваемого трафика);

- при нахождении нескольких пар параметров  $W_0'$  и  $m'$ , обеспечивающих одинаковое значение пропускной способности, алгоритм должен осуществлять выбор пары параметров с меньшим значением  $m'$  (данное ограничение введено с целью снижения времени задержки пакетов на MAC-уровне, так как каждая дополнительная попытка передачи приводит к увеличению данного времени);

- определение количества дополнительных попыток передачи пакета  $\Delta m$  при выполнении условия:  $W_{\max} \leq 2^{m'+\Delta m} \cdot W_0'$ . Дополнительные попытки передачи пакета  $\Delta m$  определяются с целью обеспечения дополнительной возможности передачи пакета в случае, если  $m'$  попыток передач уже исчерпаны. Необходимо отметить, что параметр  $\Delta m$  зависит от максимального размера окна конкуренции  $W_{\max}$ , найденных оптимальных значений  $W_0'$  и  $m'$  и может, при определенных условиях, иметь нулевое значение.

Также, необходимо отметить, что параметры  $W_0$  и  $m$  в реальных системах беспроводной радиосвязи имеют только конечные целочисленные значения, например, для радиооборудования стандарта IEEE 802.11b со схемой DSSS (схема прямого расширения спектра сигнала с использованием псевдослучайных последовательностей) рекомендованными значения являются:  $W_0=16$ ,  $m=6$ , а максимальный размер окна конкуренции  $W_{\max}=1024$ . В связи с этим для определения оптимальных значений параметров  $W_0'$  и  $m'$  целесообразно использовать методы целочисленной оптимизации, а учитывая нелинейность целевой функции логично использовать методы нелинейной целочисленной оптимизации. К числу таких методов относятся: метод полного направленного перебора, дискретный аналог метода Гаусса-Зейделя и др.

Поскольку процесс поиска оптимальных значений параметров  $W_0'$  и  $m'$ , максимизирующих целевую функцию (пропускную способность) связан с итерационным решением системы нелинейных уравнений, определенной в главе 2, то выбор метода оптимизации целесообразно осуществлять исходя из вычислительной сложности решаемой задачи, которая в свою очередь определяется количеством возможных значений целевой функции в пространстве



размерностью  $\langle W_{\max} \cdot m_{\max} \rangle$ . При небольших значениях  $W_{\max}$  и  $m_{\max}$  например, для значений рекомендованных для радиоборудования стандарта IEEE 802.11b со схемой DSSS, возможно использование метода полного направленного перебора по всем возможным значениям изменяемых параметров. В противном случае целесообразно использовать оптимизатор, реализующий, например, дискретный аналог метода Гаусса-Зейделя. При этом последний метод относится к числу приближенных методов и использует информацию об унимодальности целевой функции, что позволяет существенно сократить число просматриваемых точек по сравнению с методом полного перебора. Суть метода Гаусса-Зейделя заключается в эквивалентной замене общей многопараметрической задачи поиска экстремума критерия оптимальности, последовательностью однопараметрических задач поиска частных экстремумов. Частная производная оптимизируемого функционала при этом имеет следующий общий вид:

$$dI(\vec{x}) / dx_i = dI(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)_{x_l \neq i = const} / dx_i, i, l = 1, \dots, I, \quad (3.4)$$

при этом оптимальное значение  $x_i^{opt}$  может быть найдено из следующего общего условия:

$$dI(\vec{x}) / dx_i = 0, x_i = x_i^{opt}. \quad (3.5)$$

Как видно из выражения (3.4) поиск оптимальных значений параметров  $x_i^{opt}$ , удовлетворяющих экстремуму  $\partial I(\vec{x}) / \partial \vec{x} = 0$ , может быть осуществлен на основе итеративной последовательной процедуры оптимизации по каждому  $i$ -му параметру при фиксированных значениях остальных  $l$ -х параметров. Сходимость такой процедуры к оптимальному решению по всем оптимизируемым переменным гарантируется при наличии унимодальности и дифференцируемости целевой функции.

Алгоритм вычисления экстремальных координат критерия включает следующие шаги:

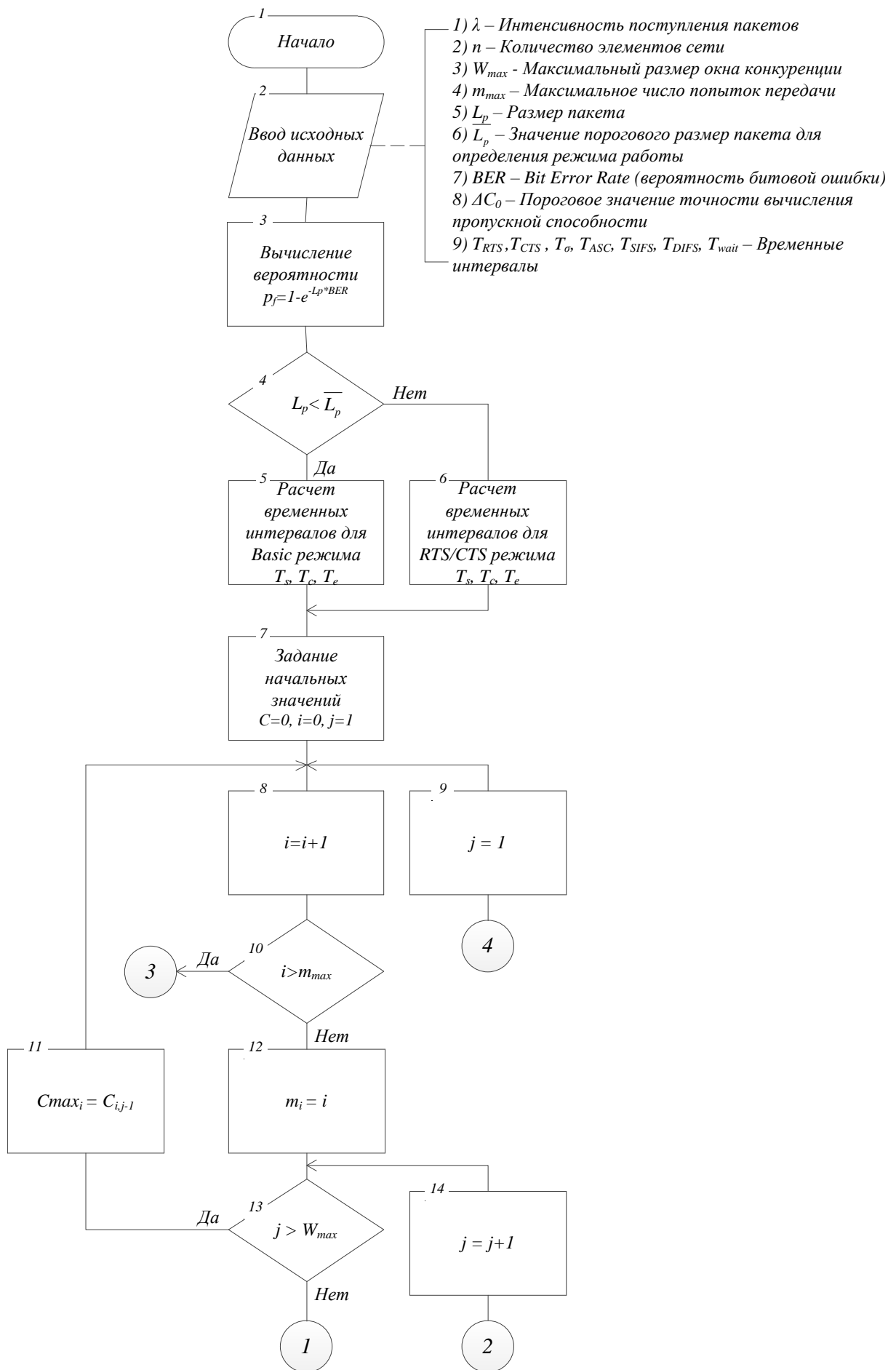
- выбор начальной оптимизируемой переменной  $x_1$  и отыскание частного экстремума ( $min, max$ )  $\partial I(\vec{x}) / \partial x_1 = 0$  при фиксированных значениях остальных переменных;
- фиксация значения  $x_1 = x_1^{opt}$  и осуществление поиска экстремума по переменной  $x_2$ , до обращения в нуль частной производной  $\partial I(\vec{x}) / \partial x_2 = 0$ ;
- фиксация значений переменных  $x_1$  и  $x_2$  на уровне частных экстремумов и поиск оптимальных значений оставшихся переменных;
- переход к повторному циклу поиска частных экстремумов (шагу 1) до тех пор, пока найденная точка экстремума окажется общей для всех переменных (момент выполнения условий по точности решения задачи оптимизации для всех переменных).

Преломляя выражения (3.4, 3.5) под решаемую оптимизационную задачу получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dC(W_0, m, N, \lambda / \mu, L_p, P_f)_{N, \lambda / \mu, L_p, P_f, =const} / dW_0 = 0, \\ dC(W_0, m, N, \lambda / \mu, L_p, P_f)_{N, \lambda / \mu, L_p, P_f, =const} / dm = 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

Итеративная последовательная оптимизация по каждому параметру системы (3.6) при фиксированных значениях остальных параметров позволит найти оптимальные значения параметров  $W_0', m'$ .

Обоснование критерия, метода и параметров оптимизации позволили осуществить синтез алгоритма настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, учитывающего состояние загруженности элементов сети и обеспечивающего повышение ее пропускной способности. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.2.



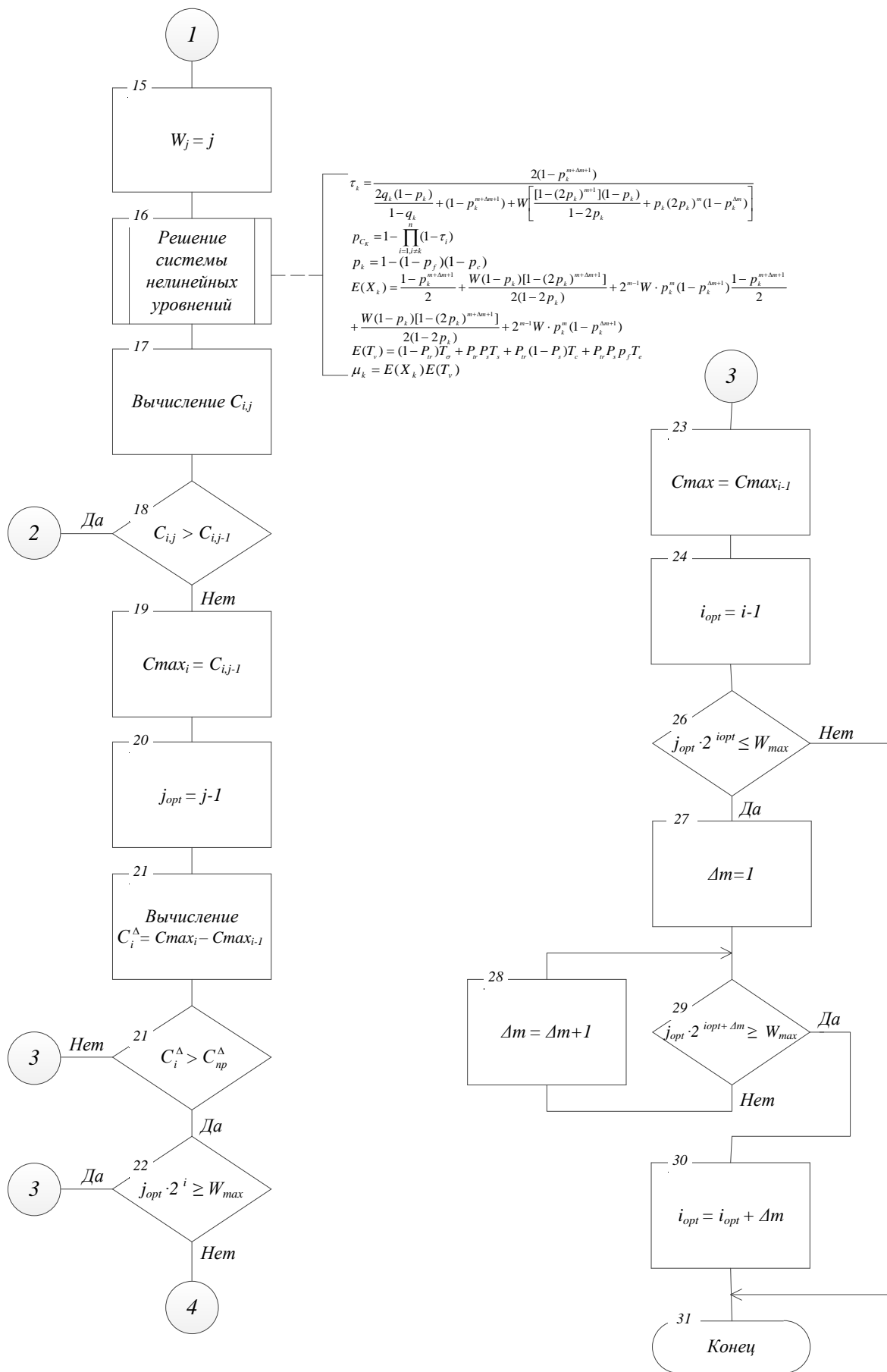


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11

*Исходные данные алгоритма:*

$\lambda$  – интенсивность поступления пакетов;

$\mu$  – скорость обработки пакетов;

$n$  – количество элементов сети;

$L_p$  – размер пакета;

$\overline{L}_p$  – пороговый размер пакета для определения режима работы;

$W_{max}$  – максимально допустимый размер окна конкуренции;

$m_{max}$  – максимально допустимое число попыток передачи;

$BER$  – Bit Error Rate (вероятность битовой ошибки);

$C_{np}^{\Delta}$  – пороговое значение точности вычисления пропускной способности;

$T_{RTS}$  – время передачи кадра RTS;

$T_{CTS}$  – время передачи кадра CTS;

$T_{ASK}$  – время передачи кадра ACK;

$T_{SIFS}$  – длительность межкадрового интервала SIFS;

$T_{DIFS}$  – длительность межкадрового интервала DIFS;

$T_{\sigma}$  – среднее время, когда ни одна из станций не ведет передачу;

$PHY$  – длительность заголовка физического уровня;

$MAC$  – длительность MAC-заголовка кадра.

*Выходные данные алгоритма:*

$C_{max}$  – максимальная пропускная способность;

$i_{opt}$  – оптимальное число попыток передачи;

$j_{opt}$  – оптимальный размер окна конкуренции;

$\Delta m$  – число дополнительных попыток передачи.

*Вспомогательные данные:*

$T_s$  – среднее время, которое канал остается занятым во время успешной передачи;

$T_c$  – среднее время, которое канал остается занятым во время возникновения коллизии;

$T_e$  – среднее время, которое канал остается занятым в случае искажения пакета помехой;

$m_i$  – число попыток передачи на  $i$ -ом шаге;

$W_j$  – размер окна конкуренции на  $j$ -ом шаге;

$C_{\max_i}$  – максимальная пропускная способность на  $i$ -ом шаге;

$C_i^\Delta$  – относительный прирост пропускной способности на  $i$ -ом шаге, который является критерием останова работы алгоритма (с фиксацией найденных значений  $W_j$  и  $m_i$ ), если  $C_i^\Delta < C_{np}^\Delta$ .

*Подпрограммы:*

В блоке 16 алгоритма используется встроенная функция *Mathcad – Given*, реализующая решение системы нелинейных уравнений, позволяющая вычислить значения вероятностей передачи, неудачной передачи каждой станцией сети и время обработки одного пакета. Данные значения используются для расчета пропускной способности канала, в зависимости от интенсивности поступления пакетов, размера окна конкуренции и числа попыток передач.

Алгоритм можно описать следующей последовательностью действий:

- на этапах 1-3 осуществляется ввод исходных данных и вычисление вероятности повреждения пакета  $p_f$ ;

- на этапах 4-6 осуществляется определение режима работы протокола и расчет значений соответствующих временных интервалов  $T_s$ ,  $T_c$ ,  $T_e$ . Если длина пакета  $L_p$  больше заданного порогового значения  $\overline{L_p}$ , то используется RTS/CTS режим, если меньше, то базовый режим;

- на этапе 7 определяются начальные значения: пропускной способности  $C$ , счетчиков цикла  $i$  и  $j$ ;  $C = 0$ ,  $i = 0$ ,  $j = 1$ ;

- на этапах 8-23 выполняется цикл с изменяющимся значением числа попыток передачи. Счетчиком цикла является значение  $i$ , шаг цикла равен  $i + 1$ , условиями выхода из цикла являются: превышение значения относительного

прироста пропускной способности  $C_i^\Delta$  на  $i$ -ом шаге цикла над пороговым значения точности вычисления пропускной способности  $C_{np}^\Delta$  (этап 21), значение окна конкуренции на  $i$ -ом шаге цикла, рассчитанное с учетом оптимального значения начального окна конкуренции, больше или равно максимальному размеру окна конкуренции (этап 22).

Внутри данного цикла имеется вложенный цикл (этапы 13-18), описывающий изменение размера окна конкуренции. Счетчиком цикла является значение  $j$ , шаг цикла равен  $j + 1$ , условием выхода из цикла является значение пропускной способности, вычисленное для  $i$ -го значения числа попыток передачи и  $j$ -го значения размера окна конкуренции, меньшее, чем значение пропускной способности, полученное на предыдущем шаге цикла (этап 18). Во вложенном цикле производится решение системы нелинейных уравнений (этап 16) и вычисление пропускной способности, для  $i$ -го значения числа попыток передачи и  $j$ -го значения размера окна конкуренции (этап 17). Если условие выхода из цикла не выполняется (этап 18), то производится увеличение значения счетчика цикла (этап 14) и переход на начало цикла (этап 13). Если значение счетчика цикла  $j$  становится больше значения максимального размера окна конкуренции, то значению максимальной пропускной способности на  $i$ -ом шаге присваивается значение пропускной способности, полученное на предыдущем шаге (этап 11) и осуществляется переход на начало внешнего цикла (этап 8). На выходе вложенного цикла значению максимальной пропускной способности на  $i$ -ом шаге присваивается значение пропускной способности, полученное на предыдущем шаге (этап 19), значению оптимального размера окна конкуренции присваивается значение счетчика цикла  $j - 1$  (этап 20), производится вычисление относительного прироста пропускной способности, полученного на  $i$ -ом шаге (этап 21).

- на этапах 24-25 производится определение значений максимальной пропускной способности и оптимального значения числа попыток передачи;

- на этапе 26 производится сравнение значения окна конкуренции, полученного с помощью оптимальных значений начального окна конкуренции и числа попыток передачи, с заданным значением максимального окна конкуренции. Если полученное значение больше, то происходит переход на конец алгоритма (этап 31), если меньше или равно, то производится расчет дополнительных попыток передачи (этапы 27-29).

- на этапах 27-29 производится расчет дополнительных попыток передачи  $\Delta m$ , при контроле выполнения условия:  $j_{opt} \cdot 2^{i_{opt} + \Delta m} \geq W_{max}$  (этап 29). Если на этапе 29 условие не выполняется, то осуществляется увеличение значения числа дополнительных попыток передачи  $\Delta m + 1$  (этап 28). В противном случае осуществляется фиксация найденных значений  $\Delta m$  и производится определение суммарного числа попыток передач (этап 30).

- на этапе 31 алгоритм завершает свою работу.

### **3.3 Оценка эффективности применения алгоритма настройки параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11**

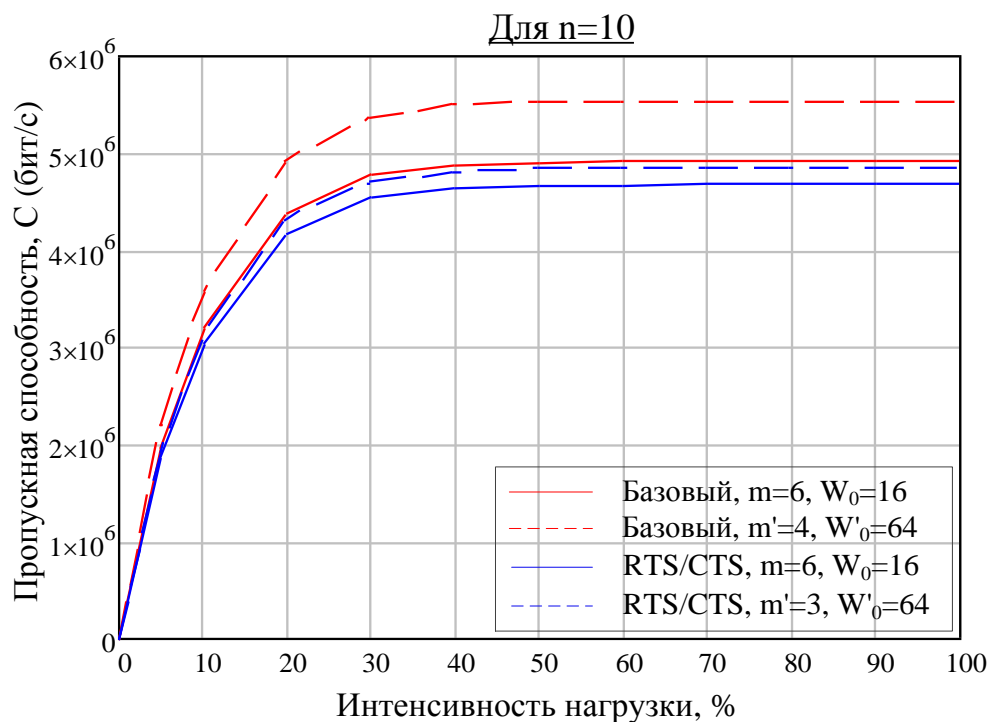
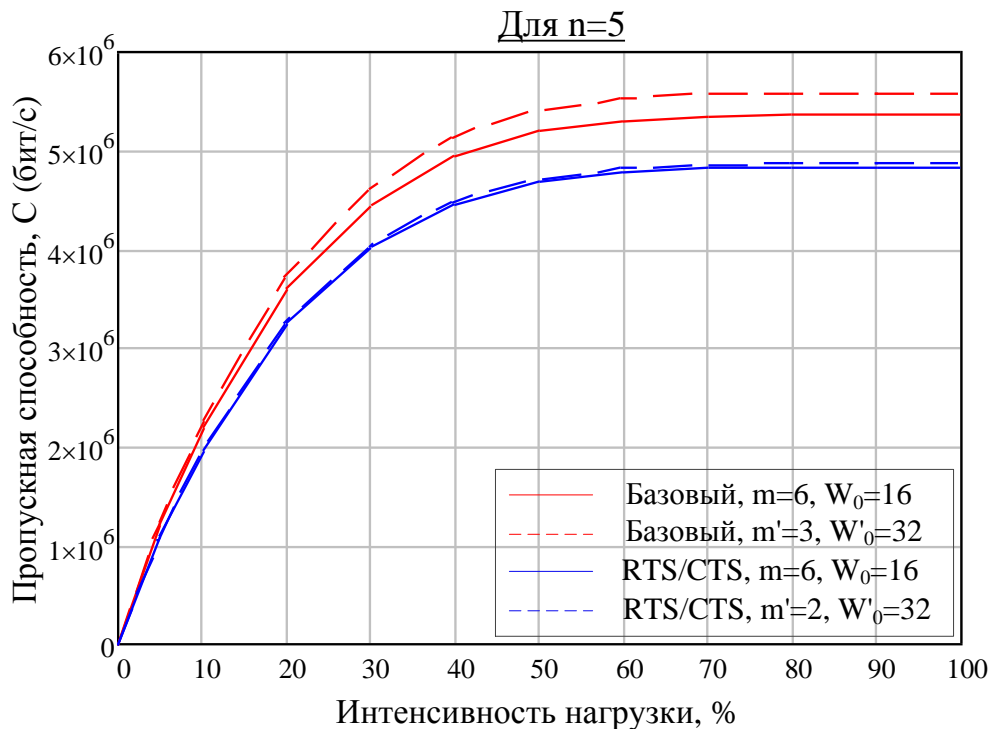
На рисунках 3.3 и 3.4 представлены зависимости пропускной способности беспроводной сети от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  для базового и RTS/CTS механизмов доступа, для условий моделирования, приведенных в таблице 2.1. Данные зависимости получены:

- для различных значений числа станций в сети;
- в условиях идеального канала и при наличии помех;
- при значениях параметров  $W_0=16$ ,  $m=6$ ,  $W_{max}=1024$ , рекомендованных для радиооборудования стандарта IEEE 802.11b со схемой DSSS;
- при оптимальных значениях параметров  $W_0'$  и  $m'$ , полученных с помощью разработанного алгоритма, с учетом предъявляемых к нему требований (п.п. 3.2).

В таблице 3.1 представлены численные значения пропускной способности, рассчитанной, как при рекомендованных стандартом IEEE 802.11b значениях



параметров  $W_0$ ,  $m$ , так и при оптимальных значений  $W_0'$ ,  $m'$ , а также представлен выигрыш по пропускной способности  $\Delta C'$  для различных вариантов количества станций в сети  $n$ . Численные значения выигрыша по пропускной способности  $\Delta C'$  приведены для режима высокой нагрузки ( $\lambda/\mu \rightarrow \max$ ).



б)

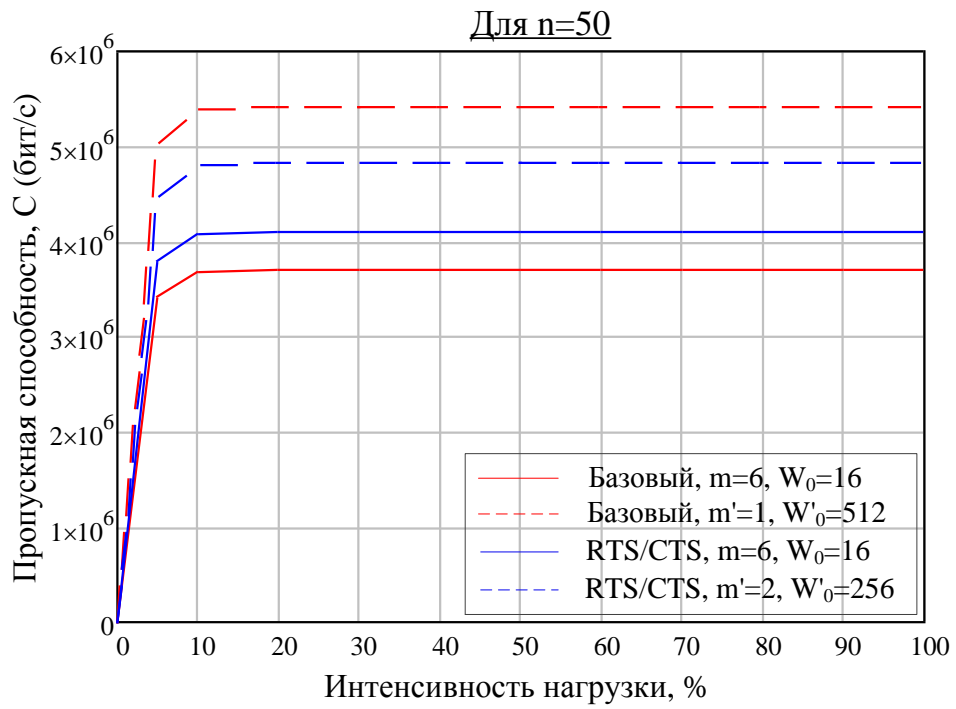
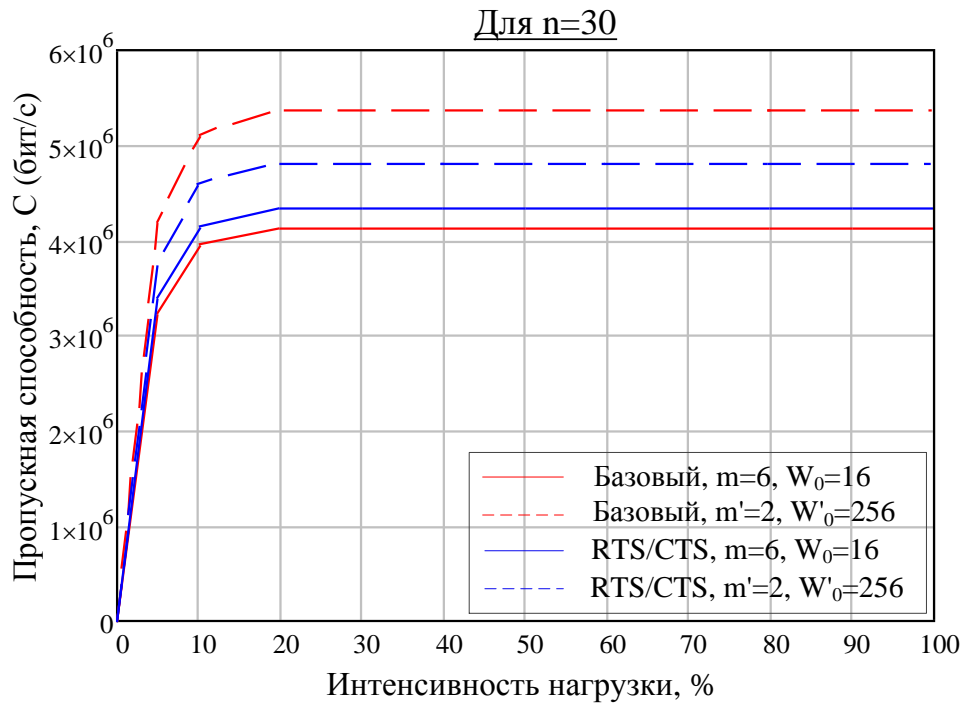
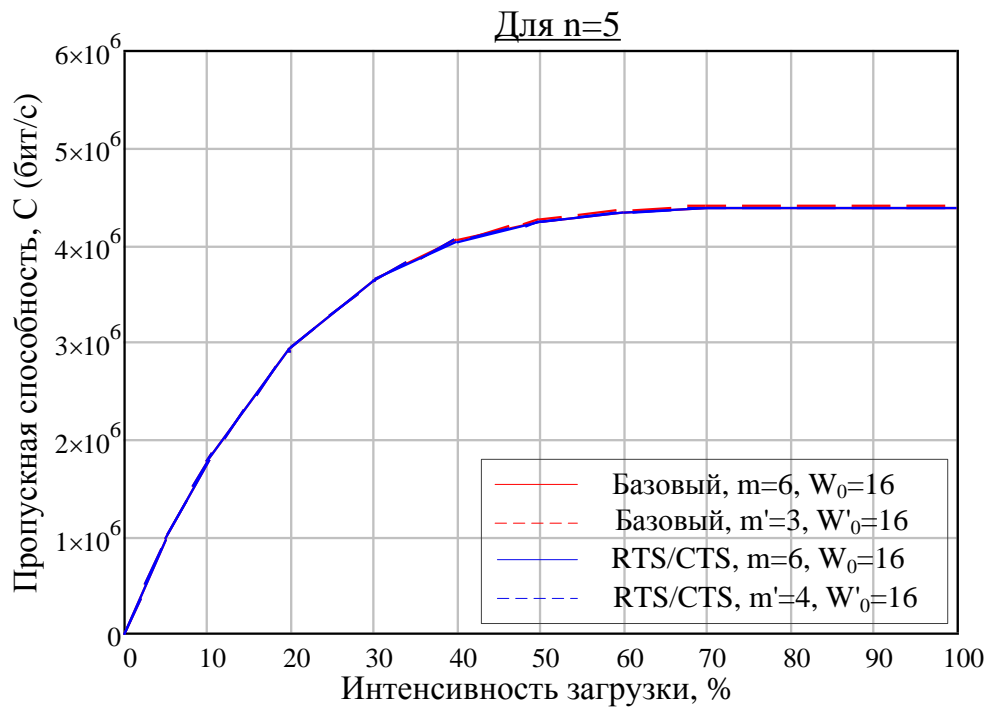
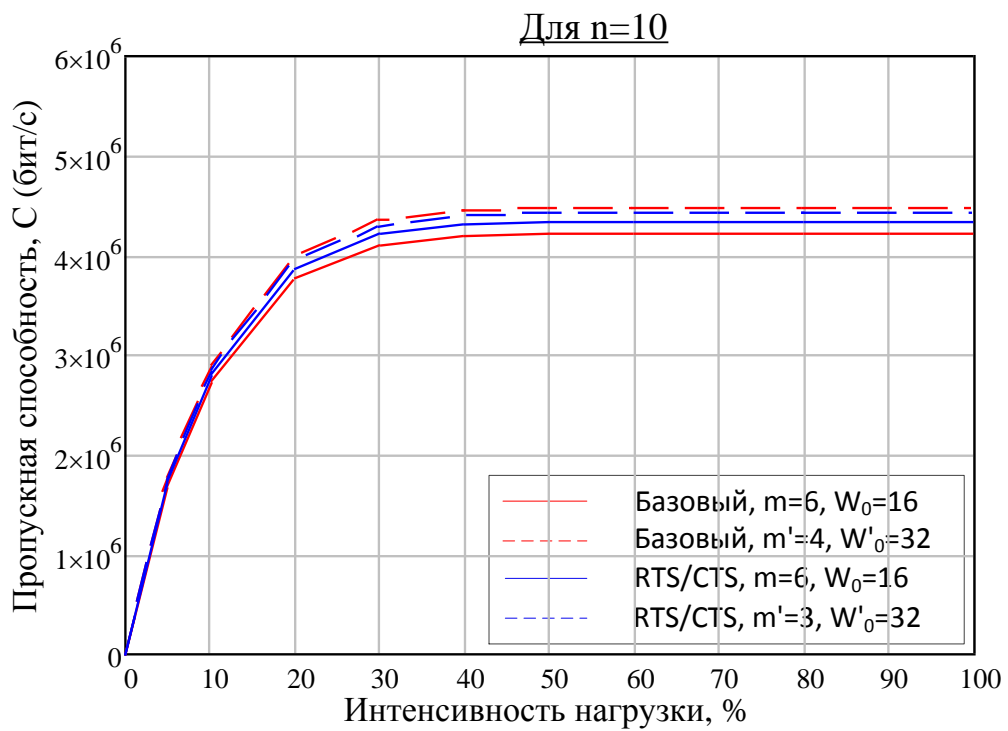


Рисунок 3.3 – Зависимость пропускной способности беспроводной сети от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  в условиях идеального канала для значений параметров  $W_0$ ,  $m$  и  $W'_0$ ,  $m'$



а)



б)

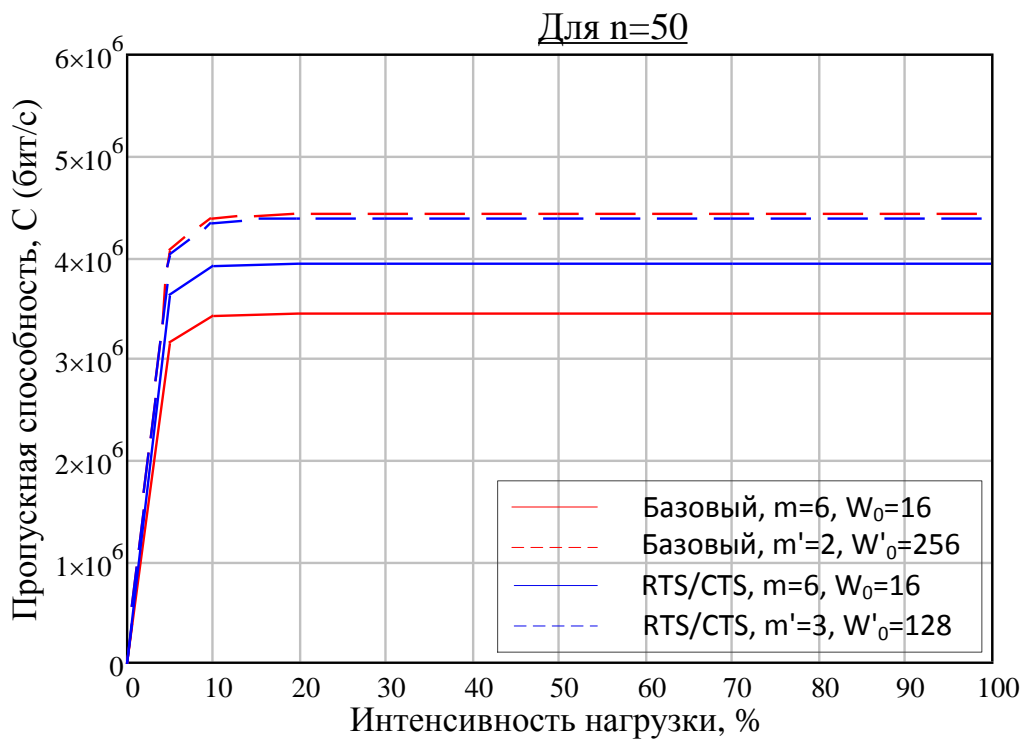
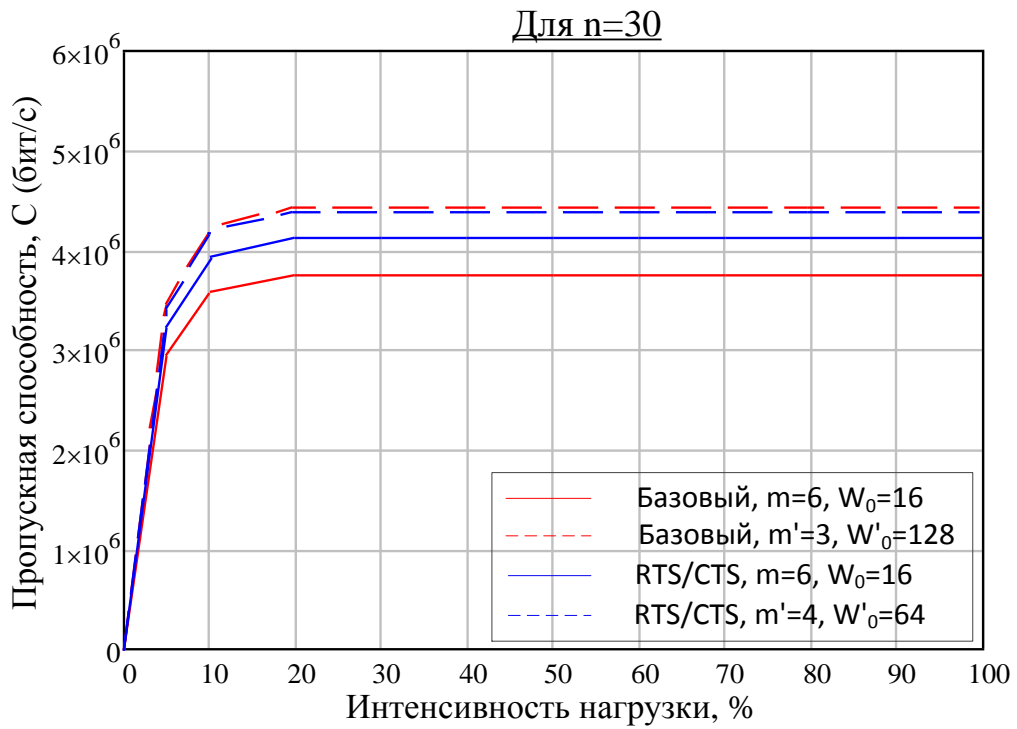


Рисунок 3.4 – Зависимость пропускной способности беспроводной сети от интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  при наличии помех в радиоканале, для значений параметров  $W_0$ ,  $m$  и  $W'_0$ ,  $m'$

Таблица 3.1 – Численные значения пропускной способности, параметров  $W_0'$ ,  $m'$ ,  $\Delta m$  и выигрыша в пропускной способности  $\Delta C'$  от оптимизации параметров

	$W_0$	$m$	$C$ , Мбит/с	Оптимальное значение $W_0'$	Оптимальное значение $m'$	Максимальное значение $C'_{\max}$ , Мбит/с	$\Delta m$	Выигрыш $\Delta C'$ , Мбит/с	Выигрыш $\Delta C'$ , %
Базовый механизм доступа, идеальный канал ( $p_f = 0$ )									
N=5	16	6	5.36	32	3	5.589	2	<b>0.229</b>	<b>4.27</b>
N=10	16	6	4.915	64	4	5.53	0	<b>0.615</b>	<b>12.51</b>
N=30	16	6	4.132	256	2*	5.539	0	<b>1.407</b>	<b>34.05</b>
N=50	16	6	3.7	512	1*	5.541	0	<b>1.841</b>	<b>49.76</b>
RTS/CTS механизм доступа, идеальный канал ( $p_f = 0$ )									
N=5	16	6	4.833	32	2	4.873	3	<b>0.04</b>	<b>0.83</b>
N=10	16	6	4.676	64	3	4.845	1	<b>0.169</b>	<b>3.62</b>
N=30	16	6	4.33	256	2*	4.815	0	<b>0.485</b>	<b>11.2</b>
N=50	16	6	4.103	256	2*	4.797	0	<b>0.694</b>	<b>16.9</b>
Базовый механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ( $p_f = 0.1$ )									
N=5	16	6	4.383	16	3	4.383	3	<b>0</b>	<b>0</b>
N=10	16	6	4.183	32	4	4.517	1	<b>0.334</b>	<b>7.98</b>
N=30	16	6	3.744	128	3*	4.508	0	<b>0.764</b>	<b>20.43</b>
N=50	16	6	3.416	256	2*	4.484	0	<b>1.068</b>	<b>31.27</b>
RTS/CTS механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ( $p_f = 0.1$ )									
N=5	16	6	4.375	16	2	4.375	4	<b>0</b>	<b>0</b>
N=10	16	6	4.326	32	3	4.467	2	<b>0.12</b>	<b>2.77</b>
N=30	16	6	4.09	64	4*	4.453	0	<b>0.363</b>	<b>8.89</b>
N=50	16	6	3.926	128	3*	4.406	0	<b>0.48</b>	<b>12.23</b>
* - значения являются оптимальными, по критерию максимума пропускной способности, при выполнении условия (ограничения): $2^{m'} \cdot W_0' \leq W_{\max}$ .									

Параметры  $W_0'$ ,  $m'$ , представленные в таблице 3.1, получены при соблюдении условия (ограничения) –  $2^{m'} \cdot W_0' \leq W_{\max}$ , исключающего превышения заданного значения максимального размера окна конкуренции  $W_{\max}$ . При этом согласно представленных в п.п. 3.2 требований к алгоритму, выбор пары параметров  $\{W_0', m'\}$ , обеспечивающей максимум пропускной способности, осуществлялся из всего найденного множества таких пар, но с наименьшим значением  $m'$ .

Анализ рисунков 3.3, 3.4 и таблицы 3.1 позволяет сделать следующие выводы:

1. При небольшом значении интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  и небольшом количестве станций в сети (менее 10) выигрыш по пропускной способности от

оптимизации параметров канального уровня  $W_0$ ,  $m$  не существенен и составляет менее пяти процентов, как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа.

2. С ростом интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  и с увеличением количества станций в сети прирост пропускной способности  $\Delta C'$  возрастает и может составлять (для условий моделирования, приведенных в таблице 2.1):

а) для идеального канала ( $p_f = 0$ ):

- до 50% для базового механизма доступа;

- до 17% для RTS/CTS механизма доступа;

б) при наличии в канале помех ( $p_f = 0.1$ ):

- до 31% для базового механизма доступа;

- до 12% для RTS/CTS механизма доступа,

в сравнении с показателями, полученными для значений параметров  $W_0$ ,  $m$ , рекомендованными стандартом IEEE 802.11.

3. Оптимальные значения параметров  $W_0'$ ,  $m'$  при наличии помех в канале отличаются от аналогичных параметров для условий идеального канала. При этом для небольшого количества станций в сети (менее 10) выигрыш по пропускной способности от оптимизации параметров канального уровня отсутствует, так как параметры  $W_0=16$ ,  $m=6$ , рекомендованные стандартом IEEE 802.11 b, являются оптимальными, как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа.

4. В главе 2, в результате проведенного анализа, был сделан вывод о том, что:

а) в условиях идеального канала применение базового механизма доступа дает выигрыш по пропускной способности при небольшом числе станций. При числе станций более 20 выгодным становится применение RTS/CTS режима;

б) в условиях канала с помехами применение базового механизма доступа дает незначительный выигрыш по пропускной способности при небольшом числе станций (до 5 станций). При числе станций более 5 выгодным становится применение RTS/CTS режима и чем больше размерность сети, тем больше и выигрыш по пропускной способности.

Однако, анализ зависимостей (рис. 3.3, 3.4), построенных с оптимальными значениями параметров  $W_0'$ ,  $m'$  позволяет сделать **важный и практически значимый** вывод:

а) в условиях идеального канала применение базового механизма доступа является предпочтительным при любом количестве станций в сети, так как данный режим обеспечивает существенный выигрыш по пропускной способности в отношении RTS/CTS режима (рис. 3.3);

б) в условиях канала с помехами – базовый механизм доступа и механизм RTS/CTS, практически при любом количестве станций в сети, обеспечивают **очень близкие** значения пропускной способности (рис. 3.4) и это несмотря на то, что механизму RTS/CTS характерно наличие дополнительных протокольных накладных расходов в виде кадров RTS, CTS (и соответственно межкадровых интервалов SIFS), которые априорно существенно снижают его производительность. Данный факт можно объяснить немного меньшей степенью зависимости RTS/CTS механизма от самой процедуры оптимизации параметров  $W_0$ ,  $m$ , в сравнении с базовым механизма доступа, что было показано в п.п. 2.5 (см. рис. 2.11-2.14).

Таким образом, ключевым и примечательным является тот факт, что в результате настройки параметров канального уровня механизм доступа RTS/CTS может обеспечивать практически одинаковые с базовым механизмом показатели пропускной способности, но при этом использование механизма RTS/CTS является предпочтительным, так как он дополнительно решает проблему "скрытых" станций в сети.

#### **Выводы по главе:**

1. В данной главе осуществлена разработка алгоритма настройки параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего повышение пропускной способности сети. С использованием разработанного алгоритма проведена оценка эффективности применения механизма настройки параметров  $W_0$ ,  $m$ , за счет поиска их оптимальных значений, обеспечивающих

повышение пропускной способности сети для заданных условий функционирования. Показано, что:

- при небольшом значении интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  и небольшом количестве станций в сети (менее 10) выигрыш по пропускной способности от оптимизации параметров  $W_0$ ,  $m$  не существенен и составляет менее пяти процентов, как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа;

- с ростом интенсивности нагрузки  $\lambda/\mu$  и с увеличением количества станций в сети прирост пропускной способности возрастает и может составлять:

- а) для идеального канала ( $p_f = 0$ ):

- до 50% для базового механизма доступа;

- до 17% для RTS/CTS механизма доступа;

- б) при наличии в канале помех ( $p_f = 0.1$ ):

- до 31% для базового механизма доступа;

- до 12% для RTS/CTS механизма доступа,

в сравнении с показателями, полученными для значений параметров  $W_0$ ,  $m$ , рекомендованными стандартом IEEE 802.11.

2. Оптимальные значения параметров  $W_0'$ ,  $m'$  при наличии помех в канале отличаются от аналогичных параметров для условий идеального канала. При этом для небольшого количества станций в сети (менее 10) выигрыш по пропускной способности от оптимизации параметров канального уровня отсутствует, так как параметры  $W_0=16$ ,  $m=6$ , рекомендованные стандартом IEEE 802.11 b, являются оптимальными, как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа.

3. В условиях канала с помехами базовый механизм доступа и механизм RTS/CTS, практически при любом количестве станций в сети, обеспечивают очень близкие значения пропускной способности и это несмотря на то, что механизму RTS/CTS характерно наличие дополнительных накладных расходов в виде кадров RTS, CTS (и соответственно межкадровых интервалов SIFS), снижающих его производительность. При этом использование механизма RTS/CTS является предпочтительным, так как он дополнительно решает проблему "скрытых" станций в сети.



# **ГЛАВА 4. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА IEEE 802.11, УЧИТЫВАЮЩИЙ СОСТОЯНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ СТАБИЛИЗАЦИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ НА МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЙ НАГРУЗКИ**

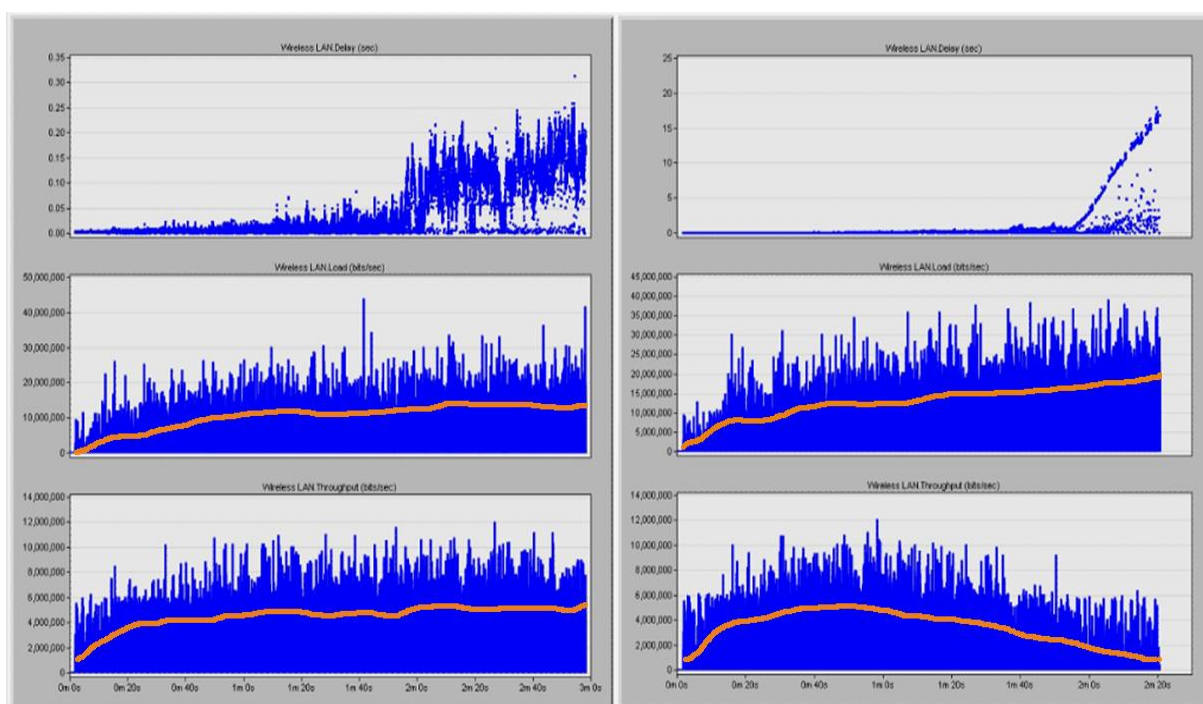
## **4.1 Постановка задачи по разработке алгоритма**

Одна из основных проблем построения беспроводных систем связи – это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи [36, 106-108]. При этом управление доступом и обменом данными представляет собой набор стратегий и механизмов, позволяющих сети эффективно удовлетворять широкий спектр запросов на обслуживание. В общем случае контроль управления доступом представляет собой некоторую оценку, которую производит сеть перед тем, как принять предлагаемое новое соединение. Это процесс принятия решения о том, какой ресурс (частотный, временной, пространственный, кодовый) можно (или нельзя) выделить для нового запроса, поступившего в сеть и при этом не допустить перегрузки сетевых ресурсов.

Известно, что протоколам множественного случайного доступа (Aloha, S-Aloha, CSMA/CA и т.д.) свойственна бистабильность, которая заключается в спонтанном снижении производительности протокола при увеличении интенсивности поступающей нагрузки сверх некоторого порогового максимального значения [109]. Разработанная в главе 2 модель позволяет оценить показатели производительности беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, функционирующей при различных значениях интенсивности входной нагрузки (от ненасыщенного до насыщенного состояний), но не учитывает режим перенасыщения сети. Данный режим характеризует состояние сети, при котором независимо от способа увеличения интенсивности поступающей нагрузки, фактическая обслуженная нагрузка может, как возрастать, так и уменьшаться.

Очевидно, что переход сети в такой режим приводит к ее перегрузке: стремительному увеличению времени задержки пакета и снижению максимальной пропускной способности сети.

Для косвенного подтверждения данного факта было проведено имитационное компьютерное моделирование в среде OpNet (релиз RiverBed Modeler), которое заключалось в том, что для сети, состоящей из 50 станций стандарта 802.11 b, подключенных к одной точке доступа осуществлялась оценка средних значений задержек передачи пакетов и пропускной способности, при различных режимах нагрузки (выбор среды и условий моделирования подробно рассмотрены в главе 5). При этом режим нагрузки регулировался интенсивностью поступления пакетов в единицу времени. На рисунке 4.1 представлены зависимости времени задержки пакета и пропускной способности сети для различных режимов интенсивности входной нагрузки.



а)

б)

Рисунок 4.1 – Зависимости времени задержки пакета в сети и ее пропускной способности для различных режимов интенсивности входной нагрузки ((а) – насыщенное состояние сети; (б) – режим перегруженной сети)

Результаты моделирования подтвердили факт наличия максимального значения интенсивности входной нагрузки, при превышении которого производительность сети начинала уменьшаться (пропускная способность снижается, а время задержки пакета возрастает). Необходимо отметить, что в существующих методах доступа стандарта IEEE 802.11 (DCF, PCF) **отсутствуют** какие либо механизмы предотвращения перегрузок беспроводной сети. В связи с этим, актуальной является задача по разработке алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающего стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети. При этом механизм стабилизации может быть реализован за счет формирования решающего правила (критерия) по допуску в канал нового информационного потока, на основании оценки остаточной пропускной способности сети и сравнении ее с требованием поступившего на обслуживание запроса. Остаточная пропускная способность может быть определена, как разница между оптимизированной пропускной способностью сети при текущем режиме нагрузки (по результатам работы алгоритма настройки параметров канального уровня) и рассчитанной пропускной способностью в режиме максимальной нагрузки (насыщенное состояние сети). Формальная постановка задачи может быть представлена в следующем виде:

$$C \rightarrow \max_{m, W_0, \lambda} \begin{cases} C_{mp}(n+1) < \Delta C, & L_p = const, \\ p_f = const, \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $\Delta C = |C_s(q=0) - C_u(q)|$  – остаточная пропускная способность канала;  $C_{mp}(n+1)$  – требуемое значение пропускной способности для нового информационного потока (нового запроса на обслуживание).

Необходимо отметить, что реализация данного алгоритма позволит обеспечить выполнение требований качества обслуживания запросов (QoS) по показателю пропускной способности.

## 4.2 Методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загрузки элементов сети и формирующая решающее правило по допуску в канал нового информационного потока

Перед тем как приступить к разработке методики необходимо определиться с выбором стратегии управления доступом к беспроводному каналу связи. Для этого кратко рассмотрим основные существующие подходы в этой области [110-112, 29]. Существующие стратегии (подходы) управления доступом к среде передачи данных в общем случае делятся на две категории: стратегии на основе измерений (оценки) и на основе параметров (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Стратегии управления доступом к среде передачи данных

Для управления доступом на основе параметров – используются априорные спецификации обмена данными для определения параметров детерминированной или стохастической модели. Общий смысл заключается в следующем: удовлетворение нового запроса на обслуживание не должно стать причиной роста задержек для существующего потока данных, в результате чего не будут выполняться требования QoS [113].

В детерминированной модели реализуется подход, рассчитанный на наихудший случай и пиковую скорость передачи данных, тогда как стохастическая модель основывается на эффективной полосе пропускания. То

есть детерминированные модели характеризуют поведение процесса обмена данными в наихудшем случае на одной временной шкале, а стохастические модели, которые основываются на эффективном распределении полосы пропускания, более подходят для достижения заметного выигрыша за счет статистического мультиплексирования. Подход на основе параметров обеспечивает гарантированное качество предоставления услуг, но часто использует сетевые ресурсы не в полной мере.

Детерминированный подход к управлению доступом может базироваться либо на пиковой скорости передачи данных, либо на наихудшем случае. В первом варианте резервируется полоса пропускания, необходимая для пиковой скорости соединения. Во втором варианте источник потока данных характеризуется такими показателями, как средняя скорость передачи и размер пакета.

При стохастическом подходе к управлению доступом используется концепция равнозначных полос пропускания. Обычно априорное определение характеристик процесса обмена данными основывается на динамической или статической аппроксимации. Использование динамической аппроксимации имеет смысл, если влияние характеристики индивидуального источника – существенно, а применение статической аппроксимации уместно в случае значительного эффекта статистического мультиплексирования. Передача данных производится в том случае, если сумма эквивалентных полос пропускания в канале меньше пропускной способности канала.

Несмотря на то, что подход по управлению доступом на основе параметров обеспечивает предоставление гарантированного обслуживания, он имеет два основных недостатка:

- пользователю очень сложно точно охарактеризовать процесс обмена данными заранее. В результате чего, показатели сетевого взаимодействия не носят строго определенный характер;
- имеет место компромисс между возможностями этой политики и выигрышем от статистического мультиплексирования.

Управление доступом на основе измерений (оценки) предлагает пользователям механизм одновременного обеспечения QoS без запроса априорных спецификаций передаваемых данных и постоянного контроля соблюдения правил [114, 115]. Данный подход основывается на оценке действительной трафиковой нагрузки в сети с целью формирования решающих правил по допуску в сеть нового потока. Стратегии управления доступом на основе измерений имеют ряд преимуществ по сравнению со стратегиями управления доступом на основе параметров:

- дескриптор процесса обмена данными, который задается пользователем, позволяет достаточно точно, хотя и с некоторыми допущениями, предварительно охарактеризовать характер передаваемых данных, что важно при осуществлении реализации механизма управления доступом. Примером может служить характеристика пиковой скорости передачи в процессе обмена данными приложений реального масштаба времени;

- адаптируемость к создаваемой нагрузке, так как процесс обмена данными, базирующийся на управлении доступом на основе измерений, обычно имеет характеристики, которые во время сеанса не ведут к перегрузке сетевых ресурсов, так как перераспределение ресурсов происходит постоянно, на основании пересчета показателей в наблюдаемом временном интервале.

Проведенный анализ существующих стратегий управления доступом к среде передачи данных [29, 42, 58, 71, 72, 111] позволяет сделать вывод, что для беспроводного сегмента наиболее подходящей будет та стратегия, которая позволит эффективно решать задачу по ограничению количества потоков, поступающих в сетевой сегмент, таким образом, чтобы каждый из них мог получить определенное (требуемое) качество обслуживания. Следовательно, наиболее подходящей, является стратегия управления доступом на основе измерений. Исходя из этого, возникает задача по предварительной оценке поступающего нового потока (нового запроса), с целью предотвращения ухудшения качества обслуживания QoS для уже существующих потоков, вследствие увеличения нагрузки на сеть. При этом управление доступом

определяется как политика, в соответствии с которой на поступающие в сеть потоки накладываются некоторые условные ограничения, например ограничения по пропускной способности.

В соответствии с выбранным подходом проведем синтез методики оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающей состояние загруженности элементов сети и формирующей решающее правило по допуску в канал нового информационного потока.

Во второй главе была разработана аналитическая модель оценки производительности сетей стандарта IEEE 802.11, учитывающей состояние загруженности элементов сети и наличие помех в канале. Данная модель позволяет оценить пропускную способность беспроводного канала, как в насыщенном, так и в ненасыщенном его состоянии. Также во второй главе было показано, что в подавляющем большинстве существующих научных работ, посвященных исследованиям производительности беспроводных сетей [41, 42, 72, 97], делается предположение, что элементы сети находятся в состоянии насыщения. При этом отмечено, что для условий нормальной загрузки (ненасыщенное состояние) данные подходы дают существенно завышенные оценки среднего времени обслуживания поступающих пакетов и как следствие - не объективные показатели пропускной способности канала. Анализ условий функционирования беспроводных сетей в составе РС, проведенный в первой главе показал, что специфика данных сегментов в большинстве случаев предполагает ненасыщенный режим функционирования, а допуск в канал нового потока осуществляется без гарантий обеспечения требуемых показателей качества обслуживания. Основываясь на этом, предлагается методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загруженности элементов сети и формирующая решающее правило по допуску в канал нового потока [116].

Методика состоит из следующих основных этапов:

**Этап 1.** Вычисление вероятности коллизий  $P_{c_k}$  и вероятности передачи  $\tau_k$  для каждого  $k$ -го элемента сети  $k = 1 \dots n$ , производимое точкой доступа в процессе своей работы при изменении конфигурации сети (инициализации новой или деактивации существующей станции в сети). Вычисление осуществляется за счет решения системы нелинейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_k = 1 - \lambda_k / \mu_k, \\ p_k = 1 - (1 - p_f)(1 - p_c), \\ \tau_k = \frac{2(1 - p_k^{m+\Delta m+1})}{\frac{2q_k(1 - p_k)}{1 - q_k} + (1 - p_k^{m+\Delta m+1}) + W_0 \left[ \frac{[1 - (2p_k)^{m+1}](1 - p_k)}{1 - 2p_k} + p_k(2p_k)^m(1 - p_k^{\Delta m}) \right]}, \\ p_{c_k} = 1 - \prod_{i=1, i \neq k}^n (1 - \tau_i), \\ E(X_k) = \frac{1 - p_k^{m+\Delta m+1}}{2} + \frac{W_0(1 - p_k)[1 - (2p_k)^{m+\Delta m+1}]}{2(1 - 2p_k)} + 2^{m-1}W_0 \cdot p_k^m(1 - p_k^{\Delta m+1}), \\ E(T_v) = (1 - P_{tr})T_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e, \\ \mu_k = E(X_k)E(T_v). \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Определение с помощью разработанного алгоритма (глава 3), параметров канального уровня  $W_0'$  и  $m'$ , обеспечивающих максимизацию пропускной способности сети, при вероятности пустой очереди  $q_k > 0$ .

**Этап 2.** Вычисление ненасыщенной пропускной способности  $C_u$  канала. Вычисление пропускной способности  $C_u$  при текущей интенсивности нагрузки осуществляется с помощью выражения (2.34).

**Этап 3.** Вычисление насыщенной пропускной способности  $C_s$  канала. Расчет данной пропускной способности производится так же по формуле (2.34), но при значении вероятности пустой очереди  $q_k$  для всех элементов сети равной нулю ( $q_k = 0$ ). В насыщенном состоянии элементы сети постоянно конкурируют за получение доступа к каналу, при этом, в качестве ограничения, принято, что вероятность коллизий одинакова для любого пакета. Для получения вероятности



передачи и вероятности коллизий в насыщенном состоянии, решается следующая система нелинейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_k = 1 - (1 - p_f)(1 - p_c), \\ \tau_k = \frac{2(1 - p_k^{m+\Delta m+1})}{(1 - p_k^{m+\Delta m+1}) + W_0 \left[ \frac{[1 - (2p_k)^{m+1}](1 - p_k)}{1 - 2p_k} + p_k (2p_k)^m (1 - p_k^{\Delta m}) \right]}, \\ p_{c_k} = 1 - \prod_{i=1, i \neq k}^n (1 - \tau_i), \\ E(X_k) = \frac{1 - p_k^{m+\Delta m+1}}{2} + \frac{W_0(1 - p_k)[1 - (2p_k)^{m+\Delta m+1}]}{2(1 - 2p_k)} + 2^{m-1} W_0 \cdot p_k^m (1 - p_k^{\Delta m+1}), \\ E(T_v) = (1 - P_{tr})T_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e, \\ \mu_k = E(X_k)E(T_v). \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Определение с помощью разработанного алгоритма, параметров канального уровня  $W_0'$  и  $m'$ , обеспечивающих максимизацию пропускной способности сети, при вероятности пустой очереди  $q_k = 0$ . Следовательно, ожидаемая насыщенная пропускная способность  $C_s$  рассчитывается, как:

$$C_s = \frac{E[L_p]P_{tr}P_s}{(1 - P_{tr})t_\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c + P_{tr}P_s p_f T_e}. \quad (4.4)$$

**Этап 4.** Определение остаточной пропускной способности канала. Значение остаточной пропускной способности канала  $\Delta C$  определяется как разница между насыщенной  $C_s$  и ненасыщенной  $C_u$  пропускной способностью:

$$\Delta C = C_s - C_u. \quad (4.5)$$

Пример определения остаточной пропускной способности беспроводного канала при интенсивности входной нагрузки  $\lambda/\mu = 10\%$  и количестве станций в сети  $n = 10$  представлен на рисунке 4.3.

**Этап 5.** Формирование критерия (решающего правила) по допуску в канал нового потока (информационного потока от новой станции в сети  $n_{new} = n + 1$ ). В результате оценки остаточной пропускной способности канала  $\Delta C$  и с учетом требуемой пропускной способности  $C_{mp}$  поступившего потока, принимается решение о передаче данных по запросу. В качестве критерия допуска нового потока в канал предлагается использовать критерий превосходства остаточной

пропускной способности канала  $\Delta C$  над требуемым значением пропускной способности нового потока  $C_{mp}$ , то есть при условии, что  $C_{mp} < \Delta C$ , поток обслуживается с обеспечением требований QoS по пропускной способности. В противном случае запрос отклоняется и производится переход к 1 этапу.

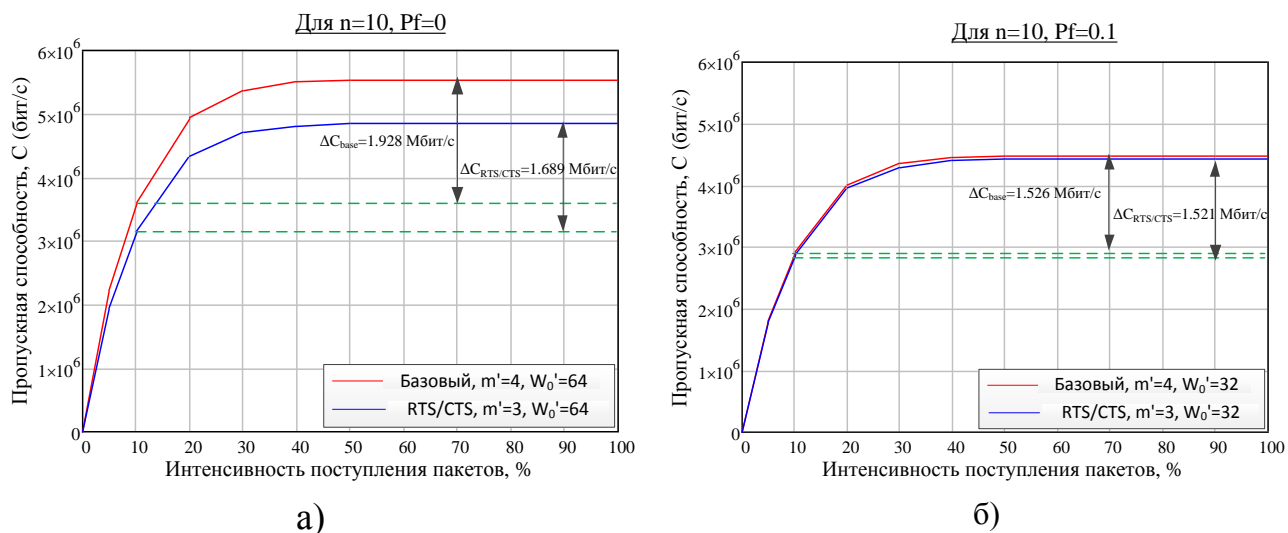


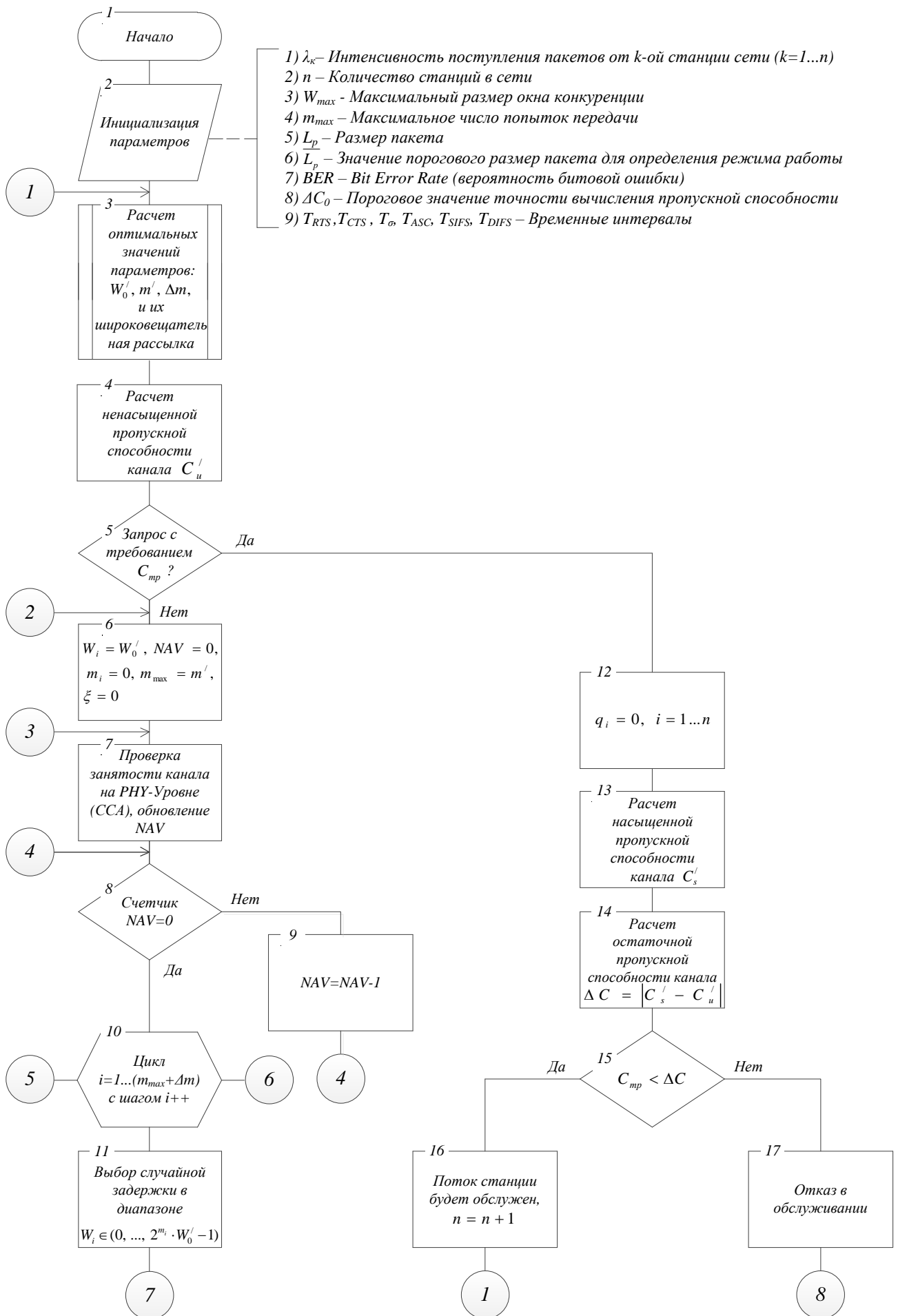
Рисунок 4.3 – Пример определения остаточной пропускной способности беспроводного канала при интенсивности входной нагрузки  $\lambda/\mu = 10\%$ , количестве станций в сети  $n = 10$ , при  $p_f = 0$  (рис. (а)) и  $p_f = 0.1$  (рис. (б))

Следует отметить, что предлагаемая методика может быть использована как при проектировании новых систем беспроводного доступа, так и при повышении эффективности функционирования уже существующих систем. При этом в качестве критерия эффективности функционирования сетей беспроводного доступа, может выступать коэффициент использования ресурса сети, при условии обеспечения максимальной загрузки ресурса не приводящей к перегрузке сети. Это значит, что коэффициент использования ресурса должен приближаться к единице, но не настолько, чтобы очереди пакетов к нему были бы постоянно большими, приводя к задержкам и потерям из-за переполнения внутренних буферов в точках доступа. Кроме того, при разработке конкретного алгоритма распределенного управления доступом к ресурсам беспроводной сети передачи данных, учитывающего данную методику, возможна практическая реализация данного подхода в точках доступа стандарта IEEE 802.11. Следовательно, практический интерес представляет синтез такого алгоритма, который будет проведен в следующем разделе.

### **4.3 Модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети**

В соответствии с целевой установкой (4.1) основной функциональной задачей разрабатываемого алгоритма является повышение эффективности использования сетевых ресурсов стандарта IEEE 802.11 (повышение производительности сети) при выполнении требований QoS по пропускной способности для новых запросов и исключении перегрузки сети (стабилизации пропускной способности на значениях близких к максимальным).

На основании этого и с учетом разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале (глава 2), алгоритма настройки параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 (глава 3), методики оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала (п.п. 4.2), можно предложить алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети [117]. Блок-схема данного алгоритма представлена на рисунке 4.4. Данный алгоритм реализует все процедуры существующего алгоритма распределенного доступа DCF стандарта 802.11 и модифицирует его в части предложенной методики и разработанных новых правил по обеспечению требований QoS по показателю пропускной способности.



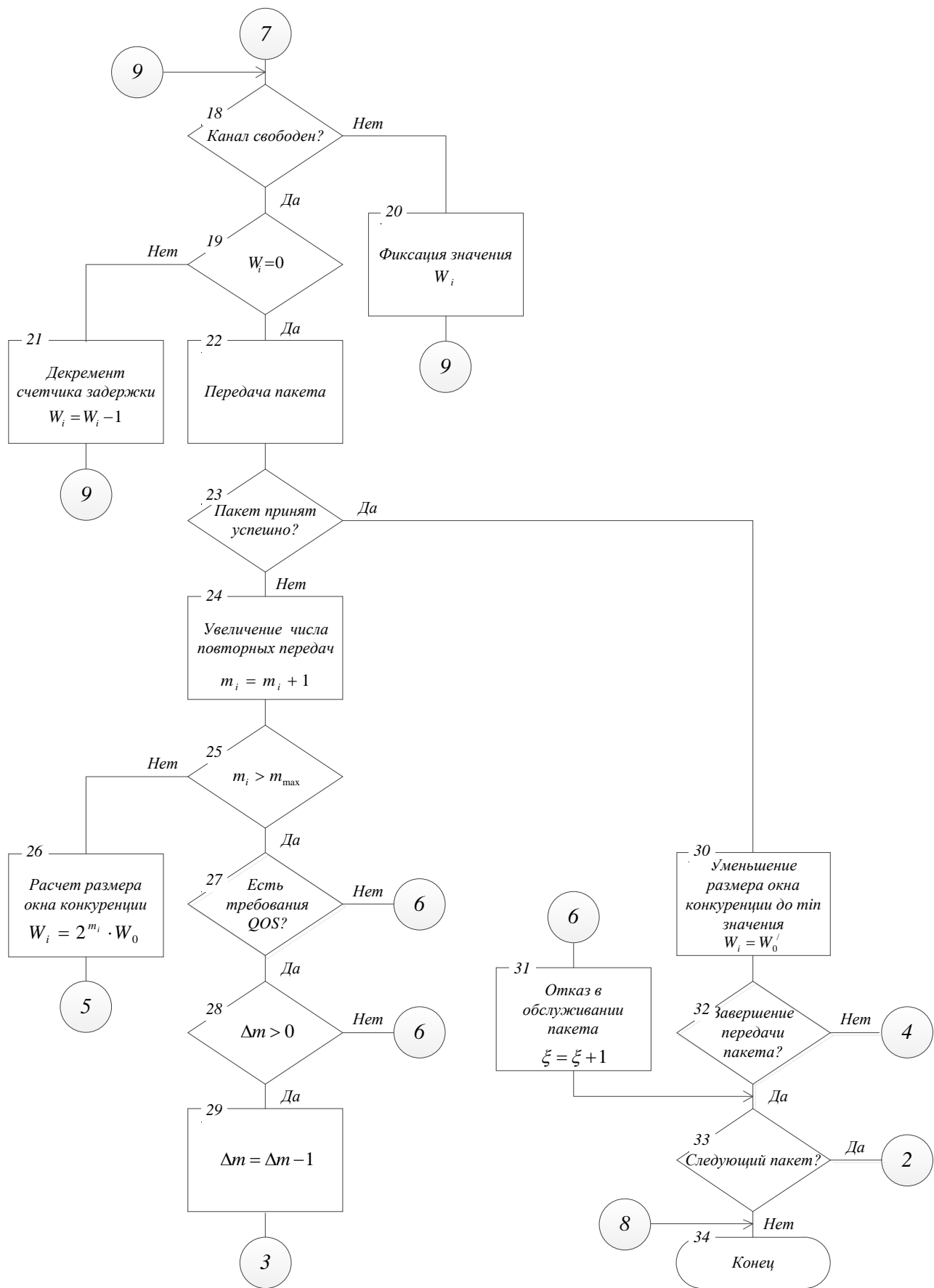


Рисунок 4.4 – Блок-схема модифицированного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11

*Исходные данные для алгоритма аналогичны приведенным в п.п. 3.2.*

*Выходные данные алгоритма (дополнительно к данным приведенным в п.п.3.2):*

$\xi$  – число потерянных пакетов;

$C_s$  – значение пропускной способности канала в режиме насыщения;

$\Delta C$  – остаточная пропускная способность канала.

*Вспомогательные данные (дополнительно к данным приведенным в п.п.3.2):*

$NAV$  – значение вектора распределения ресурсов;

$C_{mp}$  – требуемая пропускная способность новой станции в сети.

*Подпрограммы:*

В блоке 3 используется алгоритм настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, описанный в п.п. 3.2. Он позволяет получить оптимальные значения параметров начального окна конкуренции  $W_0'$ , числа попыток передач  $m'$  и числа дополнительных попыток передач  $\Delta m$ , при которых пропускная способность канала максимальна.

Алгоритм можно описать следующей последовательностью действий:

- на этапе 2 осуществляется инициализация параметров, используемых в алгоритме; при этом предполагается, что станции сети осуществляют передачу данных с различной, но постоянной интенсивностью  $\lambda_k = const (k = 1 \dots n)$ ;

- на этапе 3 производится расчет оптимальных значений параметров начального окна конкуренции  $W_0'$ , числа попыток передач  $m'$ , числа дополнительных попыток передач  $\Delta m$ ; далее точкой доступа (или координирующей станцией в сети) осуществляется широковещательная рассылка рассчитанных значений параметров  $W_0'$ ,  $m'$ ,  $\Delta m$  всем станциям сети; станции осуществляют корректировку своих параметров канального уровня;

- на этапе 4 производится расчет ненасыщенной пропускной способности канала  $C'_u$ ;

- на этапе 5 определяется наличие в запросе новой станции в сети требования о необходимости предоставления ей пропускной способности в размере  $C_{mp}$ . Если такое требование содержится в запросе, то производится расчет

насыщенной пропускной способности канала  $C'_s$  (этапы 12-13), а затем расчет остаточной пропускной способности канала  $\Delta C$  (этап 14). Производится сравнение значений требуемой пропускной способности с остаточной пропускной способностью (этап 15). Если значение требуемой пропускной способности меньше значения остаточной, то принимается решение о том, что запрос новой станции будет обслужен и значение количества станций в сети увеличивается на единицу (этап 16), при этом осуществляется переход к 3-му этапу алгоритма. Если данное неравенство не выполняется, то производится отказ в обслуживании для новой станции (или происходит согласование между точкой доступа и новой станцией требуемой скорости, при выполнении условия  $C_{mp} < \Delta C$ ).

- на этапе 6 производится инициализация начальных значений параметров канального уровня для осуществления передачи трафика;

- на этапе 7 производится проверка занятости канала на РНУ-уровне и обновление значения вектора распределения ресурсов  $NAV$ ;

- на этапах 8-9 производится задержка передачи, соответствующая полученному значению  $NAV$ ;

- на этапах 9-29 выполняется цикл с изменяющимся значением счетчика цикла  $i$  от 1 до  $m_{max} + \Delta m$ , с шагом  $i+1$ . Условиями выхода из цикла являются: достижение максимального размера счетчика цикла (этап 10); успешная передача пакета с подтверждением АСК (этапы 22-23); отсутствие требования QoS для непринятого пакета (этап 27) и отсутствие дополнительных этапов передачи, в случае непринятого пакета, к которому предъявляются требования QoS (этап 28). Внутри данного цикла, производится выбор случайной задержки  $W_i$  (этап 11), определение занятости канала (этап 18). Если канал занят, то происходит фиксация значения  $W_i$  (этап 20) и осуществляется переход на этап определения занятости канала (этап 18). В случае если канал свободен, определяется текущее значение размера окна конкуренции (этап 19). Если его размер не равен 0, то осуществляется декремент значения текущего размера окна конкуренции и производится переход на этап определения занятости канала (этап 18). Если текущее значение размера окна конкуренции равно 0, то осуществляется передача

пакета (этап 22). Если переданный пакет не принят (этап 23), то осуществляется увеличение значения повторных передач  $m_i$  на единицу (этап 24).

Далее производится сравнение текущего значения числа повторных передач с максимальным значением (этап 25). При этом если текущего значения  $m_i$  меньше или равно максимальному значению  $m_{max}$ , то производится расчет нового значения размера окна конкуренции (этап 26) и происходит переход на начало цикла (этап 9). Если значение больше, то осуществляется проверка наличия требования QoS у пакета (этап 27). В случае если требование QoS у поступившего пакета отсутствует, то происходит отказ в обслуживании пакета, значение числа потерянных пакетов  $\xi$  увеличивается на единицу (этап 31) и происходит переход на 33-ий этап алгоритма. Если у поступившего пакета присутствует требование QoS, то производится анализ значения числа дополнительных попыток передачи  $\Delta m$  (этап 28). Если число дополнительных попыток передачи  $\Delta m$  больше 0, то производится уменьшение его значения на 1 (этап 29) и далее осуществляется переход к этапу проверки занятости канала на РНУ-уровне и обновления значения вектора распределения ресурсов NAV (этап 7). Если данное неравенство не выполняется, то происходит отказ в обслуживании пакета, значение числа потерянных пакетов  $\xi$  увеличивается на единицу (этап 31) и происходит переход на 33-ий этап алгоритма.

- в случае успешной передачи пакета, то есть при получении от корреспондирующей станции кадра АСК о его приеме, производится уменьшение размера окна конкуренции до минимального значения (этап 30);

- на этапе 32 производится проверка состояния завершения передачи пакета. Если передача пакета не завершена, то происходит переход к 8-му этапу алгоритма. Если передача пакета завершена, то производится определение необходимости обработки следующего пакета (этап 33). В случае поступления следующего пакета происходит переход на 6-ой этап алгоритма. Если последующие пакеты готовые для передачи отсутствуют, то алгоритм завершает свою работу (этап 34).



#### **4.4 Исследование основных свойств разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11**

К числу основных свойств (требований), которым должны удовлетворять алгоритмы, относятся [118-121]:

1. Пошаговость (дискретность). Алгоритм должен представлять собой упорядоченную совокупность четко разделенных друг от друга предписаний, образующих дискретную структуру алгоритма. Только выполнив требования одного предписания, можно приступить к выполнению следующего.

2. Детерминированность (определенность). Алгоритм не должен содержать предписаний, смысл которых может восприниматься неоднозначно. Это означает, что одна и та же команда, будучи выполнена разными исполнителями, после исполнения каждым из них должна давать одинаковый результат. Таким образом, определенность алгоритма означает, что он должен предусматривать определенный порядок выполнения действий, и состоит в совпадении получаемых результатов независимо от пользователя и применяемых технических средств.

3. Массовость (универсальность). Универсальность алгоритма заключается в обеспечении решения не одной конкретной задачи, а некоторого класса задач данного типа. Универсальность алгоритма означает, что алгоритм для решения конкретной задачи должен быть пригодным для решения целого класса однотипных задач, различающихся конкретными значениями исходных данных.

4. Результативность. Результативность алгоритма означает возможность получения результата после выполнения конечного количества операций. Также должно быть четко указано, что считать результатом работы алгоритма.

5. Точность (погрешность). Данное требование означает, что величина выходной погрешности не должна превысить некоторое значение  $\varepsilon > 0$  за конечное число шагов.

6. Сходимость. Способность алгоритма завершить свою работу при любых допустимых значениях входных данных.

7. Вычислительная сложность. Под вычислительной сложностью алгоритма понимается объем вычислений, который следует произвести, чтобы добиться определенной точности решения задачи.

8. Устойчивость. Понятие устойчивости означает, что результат вычислений непрерывным образом зависит от входных данных при условии отсутствия вычислительной погрешности.

Исследуем разработанный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 на соответствие приведенным свойствам.

а) Дискретность и детерминированность алгоритма. Анализируя разработанный алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 4.4, можно сделать вывод, что данный алгоритм составлен из четких, однозначных действий, строго отделенных друг от друга, следовательно, он удовлетворяет требованиям дискретности и детерминированности.

б) Массовость алгоритма. Массовость разработанного алгоритма определяется его способностью функционировать при различных значениях исходных данных, вводимых в блоке 2 на рисунке 4.4 (то есть при любых параметрах сети беспроводного доступа, соответствующих различным спецификациям стандарта IEEE 802.11), что обеспечивает его пригодность к решению целого класса задач подобного типа.

в) Результативность алгоритма. Результатом работы разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 являются расчетные показатели оптимальных параметров канального уровня –  $W_0'$  и  $m'$ , обеспечивающие максимизацию пропускной способности сети, как для насыщенного, так и для ненасыщенного состояний. На основании рассчитанных показателей насыщенной и ненасыщенной пропускной способности определяется остаточная пропускная способность  $\Delta C = C_s - C_u$ . Если,  $\Delta C < C_{mp}$ , то вырабатывается положительное решение на обработку вновь поступившего запроса, иначе запрос отклоняется. Данный результат работы алгоритма достигается за конечное число итераций благодаря использованию в качестве основы алгоритма, строгого метода нелинейной целочисленной

оптимизации – метода полного направленного перебора (или дискретного аналога метода Гаусса-Зейделя) и простой последовательности необходимых арифметических операций. Следовательно, можно сделать вывод о соответствии разработанного алгоритма свойству результативности.

г) Сходимость алгоритма. Необходимо исследовать разработанный алгоритм на сходимость. Сходимость алгоритма обеспечивается при выполнении двух условий: все вычислительные задачи, входящие в алгоритм, корректны, и никакой шаг алгоритма не может завершиться аварийным остановом [119]. Корректной вычислительной задачей (по Адамару-Петровскому) является задача, для которой выполнимы условия [122]:

1. При любых входных данных  $x \in X$  существует решение  $y \in Y$ .
2. Решение  $y \in Y$  единственно при определенности входных данных  $x \in X$ .
3. Решение  $y \in Y$  устойчиво к любым изменениям входных данных  $x \in X$ .

Анализ блок-схемы разработанного алгоритма, представленной на рисунке 4.4, показал, что вычислительные задачи решаются в нескольких блоках данного алгоритма. Необходимо проверить данные вычислительные задачи на корректность в соответствии с вышеприведенными условиями. Так как экспериментально установлено, что в целом алгоритм устойчив по отношению к изменению входных данных, то, следовательно, все вычислительные задачи, входящие в него, также будут устойчивы к любым изменениям входных данных. В связи с этим достаточно проверить все вычислительные задачи разработанного алгоритма на соответствие первым двум условиям Адамара-Петровского [122].

В п. 4.3 представлен порядок производимых алгоритмом вычислений. Набор арифметических действий, выполняемых алгоритмом в блоках (3, 4, 11, 13, 14, 16, 21, 24, 26, 29, 30, 31) достаточно прост и вычислительно корректен. Следовательно, все вычислительные операции алгоритма удовлетворяют первым двум условиям Адамара-Петровского.

Необходимо исследовать разработанный алгоритм на возможность аварийного останова. Аварийный останов алгоритмов, как правило, возможен в блоках, где осуществляются такие операции, как проверка какого-либо условия, деление на ноль, извлечение корня четной степени, вычисление функций, не определенных на всей числовой оси, и др. [123-125]. Анализ вычислительных операций, производимых алгоритмом в блоках (3, 4, 11, 13, 14, 16, 21, 24, 26, 29, 30, 31), показал, что при выполнении данных операций используются известные математические методы, аварийный останов в блоках, выполняющих приведенные вычисления, невозможен.

Результаты данных исследований свидетельствуют о сходимости разработанного алгоритма.

д) Оценка вычислительной сложности алгоритма распределенного управления доступом. Вычислительная сложность алгоритма – это функция, определяющая зависимость объема работы, выполняемой некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Раздел, изучающий вычислительную сложность, называется теорией сложности вычислений. Объем работы обычно измеряется абстрактными понятиями времени и пространства, называемыми вычислительными ресурсами. Время определяется количеством элементарных шагов, необходимых для решения проблемы, тогда как пространство определяется объемом памяти или места на носителе данных [124].

Количество элементарных операций, затраченных алгоритмом для решения конкретного экземпляра задачи, зависит не только от размера входных данных, но и от самих данных. Временная сложность алгоритма (в худшем случае) – это функция размера входных и выходных данных, равная максимальному количеству элементарных операций, выполняемых алгоритмом для решения экземпляра задачи указанного размера. В задачах, где размер выхода не превосходит или пропорционален размеру входа, можно рассматривать временную сложность как функцию размера только входных данных. По аналогии с временной сложностью определяют пространственную сложность

алгоритма, только здесь говорят не о количестве элементарных операций, а об объеме используемой памяти [126].

Класс сложности – это множество задач распознавания, для решения которых существуют алгоритмы, схожие по вычислительной сложности. Разработанный алгоритм распределенного управления доступом относится к "классу P", т. е. вмещает все те проблемы, решение которых считается "быстрым" (полиномиально зависящим от размера входа). Сюда относится сортировка, поиск в пространстве множества состояний, выяснение связности графов и многие другие [127].

Вычислительная (временная) сложность разработанного алгоритма в значительной мере определяется вычислительной сложностью используемого метода целочисленного нелинейного программирования. Так как число итераций для метода полного направленного перебора (или дискретного метода Гаусса-Зейделя) заранее не определено и сильно зависит от вида целевого функционала [128], структуры области допустимых решений и начальной точки оптимизации, то целесообразно исследовать вычислительную сложность разработанного алгоритма экспериментально. Для этого разработанный алгоритм был реализован в среде объектно-ориентированного программирования C++ (описание разработанной программной модели представлено в главе 5). Было произведено 100 запусков разработанного алгоритма с различными значениями входных параметров алгоритма. Среднее время решения задачи при одном запуске на персональной ЭВМ с центральным процессором Intel(R) Core(TM) i5 с тактовой частотой 3,4 ГГц составило 1,6 секунды.

Временная сложность разработанного алгоритма оценивается количеством элементарных арифметических операций, описанных в п. 4.3. В результате исследования алгоритма был произведен подсчет числа элементарных операций, необходимых для достижения конечного результата. Полный цикл работы алгоритма происходит за 34 шага, и для достижения результата необходимо выполнение приблизительно 50000 элементарных арифметических операций.

В результате исследования пространственной сложности разработанного алгоритма было определено, что для хранения промежуточных данных для расчета будет вполне достаточно 100 Кбайт оперативной памяти (например, оперативной памяти точки доступа стандарта IEEE 802.11, реализующий данный алгоритм).

Таким образом, в результате исследования вычислительной сложности разработанного алгоритма можно сделать вывод, что для современной элементной базы (например, предложенной для реализации разработанного алгоритма в рамках научно-технических предложений (п. 4.5)) дополнительные вычислительные ресурсы, необходимые для работы алгоритма, не окажут существенного влияния на работу оборудования беспроводной связи стандарта IEEE 802.11 и не внесут дополнительной задержки в процесс обслуживания поступающего трафика.

е) Оценка устойчивости алгоритма. Необходимо произвести оценку устойчивости по входным данным разработанного алгоритма. Устойчивость вычислительных алгоритмов принято оценивать по двум показателям [129]:

1. Устойчивость по целевому функционалу – зависимость значений целевого функционала (3.1, 4.1) получаемых в результате решения задачи, от изменения исходных данных;

2. Устойчивость по решению – зависимость значений оптимизируемых переменных, получаемых в результате решения задачи, от изменения исходных данных.

Устойчивость разработанного алгоритма исследовалась экспериментально, путем изменения входных данных алгоритма в заданных пределах (согласно ограничений и допущений, определенных при разработке алгоритма). Следует отметить, что в реальных сетях беспроводной связи параметры, влияющие на пропускную способность сети, имеют конечные значения, то есть ограничены. Следовательно, исходные данные, используемые в алгоритме для аналитического расчета показателей производительности беспроводной сети, должны соответствовать ряду требований. Данные требования были определены в п.п. 3.1,

4.1 в виде граничных условий и допущений, при которых осуществлялось решение поставленных задач. Экспериментальные исследования устойчивости разработанного алгоритма показали, что результаты вычислений алгоритма непрерывным образом зависят от входных данных, следовательно, разработанный алгоритм удовлетворяет свойству устойчивости [129].

#### **4.5 Научно-технические предложения по практическому использованию разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11**

Разработанный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети, может быть реализован в беспроводном радиоборудовании данного стандарта. Для этого необходимо:

- определить область применения предлагаемого алгоритма;
- определить аппаратную составляющую, на которой возможно реализовать данный алгоритм;
- определить возможность размещения модернизированной прошивки, реализующей алгоритм, на данной аппаратной базе.

Разработанный алгоритм распределенного доступа может быть использован:

- при проектировании и построения новых беспроводных сетей стандарта 802.11;
- при модернизации уже существующих беспроводных сетей стандарта 802.11, с целью повышения эффективности их функционирования (повышения производительности) и сокращения финансовых затрат на модернизацию.

Примерами такого применения могут служить беспроводные сети передачи данных, функционирующие в составе: газо(нефти) – транспортных,

энергетических, логистических, банковских систем и др. Во всех этих системах беспроводные сети используются для сбора данных или доведения управляющего воздействия до конечных устройств на уровне выполнения конечного процесса. В соответствии с этим можно выделить следующие области применения оборудования, реализующего разработанный алгоритм:

- для передачи данных с конечного оборудования (датчиков, контролеров и т.д.) – функция сбора информации;
- для передачи данных между клиентами беспроводной сети (между собой и периферийным оборудованием) – функция информационного взаимодействия.

Для реализации разработанного алгоритма может быть использовано существующее радиооборудование стандарта IEEE 802.11, обобщенная структурная схема приемо-передающего блока которого представлена на рисунке 4.5. Модуль EEPROM приемо-передающего блока хранит актуальную версию прошивки, сетевую конфигурацию и MAC-адрес устройства. Обновление программной прошивки возможно осуществить через интерфейс I2C, либо через интерфейс с хост-контроллером.

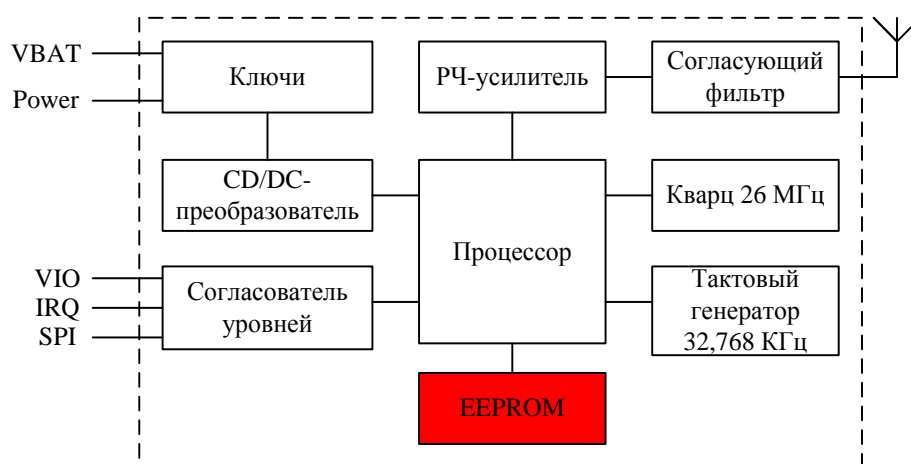


Рисунок 4.5 – Обобщенная схема приемо-передающего блока стандарта 802.11

В качестве аппаратной платформы для реализации разработанного алгоритма можно использовать недорогой Wi-Fi модуль компании Texas Instruments, выполненный на базе SimpleLink CC3000, который является



полностью законченным решением, реализующим весь необходимый стек протоколов, за счёт чего значительно снижаются требования к хост-контроллеру и его вычислительным ресурсам. Программная реализация функционала данного модуля представлена в виде драйверов и позволяет выполнять: сканирование доступных Wi-Fi-сетей, подключение к требуемой точке доступа, открывать UDP или TCP-сокет, отправлять-принимать данные и т.д. Комплекс программно-аппаратных средств поддержки модуля содержит все необходимые компоненты для быстрого начала разработки: низкоуровневые драйверы, примеры программ, описание API-функций, документацию. Драйвера имеют открытый исходный код, который размещен в сети Internet по адресу <https://github.com/joeferner/stm32-cc3000>. Это позволяет реализовать разработанный алгоритм путем замены прошивки в точке доступа и на конечных устройствах, при соответствующей доработке используемых драйверов. Реализация оборудования может иметь вид, представленный на рисунке 4.6.

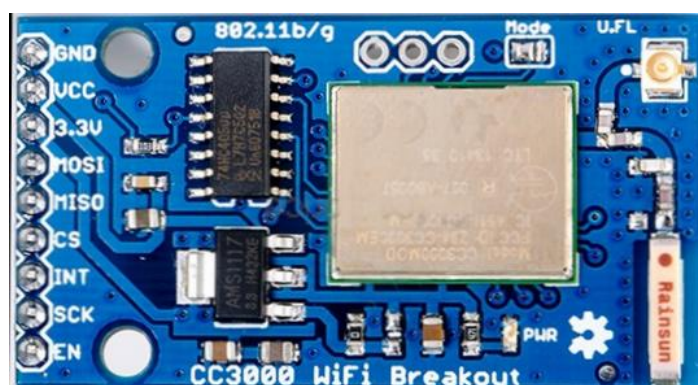


Рисунок 4.6 – Вид аппаратной платформы, используемой для реализации алгоритма

Так же в качестве аппаратной платформы для реализации разработанного алгоритма может быть использована WI-FI точка доступа K-LINE, производства АО "Концерн "Созвездие" (рисунок 4.7). Базовая станция K-LINE предназначена для профессионального применения в составе сетей операторов связи и в составе промышленных (технологических) систем связи, имеет всепогодное исполнение и широкий диапазон рабочих температур.



Рисунок 4.7 – Точка доступа K-LINE стандарта IEEE 802.11

В первой главе был проведен анализ применимости беспроводных технологий передачи данных в составе распределенных систем, на примере газотранспортного предприятия. Показано, что большинство существующих беспроводных сетей, развернуты, как правило, на ранних версиях протокола 802.11 (в частности в большинстве существующих ГТП используется оборудование стандарта 802.11b) и уже к настоящему времени не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним современным требованиям по пропускной способности и надежности передачи. Следовательно, актуальной является задача по модернизации данных сетей, при этом особенности функционирования технологических сетей (консервативность, непрерывность технологических процессов и т.д.) и их масштабы требуют минимального вмешательства в существующую инфраструктуру, а с точки зрения экономических показателей данная модернизация должна быть минимально затратной. По информации от ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" (г. Воронеж) существующие беспроводные сегменты в составе АСУ ГТП требуют увеличения пропускной способности в среднем на 15-20%, с целью реализации дополнительных сервисов и расширения конфигураций существующих сетей. Очевидно, что решение данной задачи может быть связано с поиском оптимальных решений по повышению производительности уже существующих беспроводных сетей, функционирующих в составе РС, не прибегая к варианту кардинальной замены существующего оборудования на новые, более производительные модели. При этом во второй главе было показано, что одним из вариантов повышения производительности

беспроводных сетей стандарта 802.11 является настройка (оптимизация)<sup>6</sup> параметров канального уровня при заданных условиях функционирования сети.

В связи с этим проведены исследования по повышению производительности существующих беспроводных сетей стандарта 802.11b (с механизмом доступа к каналу передачи данных DCF (базовый режим работы)), функционирующих в составе ГТП, на примере магистральной газораспределительной станции. В состав оборудования типовой анализируемой беспроводной сети магистральной ГРС<sup>7</sup> входят: точка доступа в промышленном исполнении и 63 конечных сетевых элемента, работающих по средствам стека протоколов TCP/IP, представленных технологическими датчиками (температуры, давления, утечки, потока), газоанализаторами, оборудованием системы дистанционного управления задвижками на газопроводе и датчиками охранно-пожарной сигнализации (объема, открытия, возгорания). В таблице 4.1 приведена характеристика нагрузки на беспроводный канал, создаваемая радиооборудованием, функционирующим в составе ГРС и потребность в дополнительном оборудовании, связанная с модернизацией ГРС.

С использованием разработанной математической модели процесса функционирования сети стандарта 802.11 (глава 2) и алгоритма настройки параметров канального уровня (глава 3) был проведен расчет пропускной способности беспроводной сети магистральной ГРС (таблица 4.2). Расчет проводился как при рекомендованных стандартом 802.11b значениях параметров  $W_0$ ,  $m$ , так и при найденных оптимальных значениях  $W_0'$ ,  $m'$ , для условий наличия в радиоканале помех ( $BER \approx 5 \cdot 10^{-5}$ ). Численные значения представлены в таблице 4.2.

---

<sup>6</sup> Следует отметить, что в существующих беспроводных сетях (в составе РС) при их настройке (конфигурировании), как правило, не осуществляется поиск оптимальных параметров канального уровня (ввиду отсутствия конкретных алгоритмов оптимизации), а используются рекомендованные стандартом 802.11 начальные (фиксированные) значения параметров размера окна конкуренции и количества попыток передач.

<sup>7</sup> В рамках одной ГРС (в зависимости от ее назначения) может функционировать несколько (до 10) беспроводных сетей, обеспечивающих информационный обмен в соответствующих секторах ГРС.

Таблица 4.1 – Нагрузка на беспроводный канал создаваемая радиооборудованием, функционирующим в составе ГРС

п/п	Наименование оборудования	Количество устройств в сети		Формируемая нагрузка на канал
		Существующие сети	Дополнительная потребность при модернизации ГРС	
1	Датчики на газопроводе: - датчик температуры; - датчик давления; - датчик потока; - датчик утечки газа.	<b>45</b>	<b>14</b>	До 30 Кбит/с.
		16	6	Постоянно.
		12	3	Постоянно.
		9	3	Постоянно.
		8	2	Пороговое срабатывание.
2	Автоматическое оборудование на газопроводе.	<b>5</b>	<b>1</b>	От 30 Кбит/с в дежурном режиме, до 300 Кбит/с в рабочем режиме. Постоянно.
3	Система пожарной и охранной сигнализации: - датчик движения; - датчик открытия; - датчик возгорания.	<b>13</b>	<b>7</b>	До 10 Кбит/с.
		4		Пороговое срабатывание.
		3	5	Пороговое срабатывание.
		6	2	Пороговое срабатывание.

Таблица 4.2 – Численные значения пропускной способности, параметров  $W_0'$ ,  $m'$ ,  $\Delta m$  и выигрыша в пропускной способности  $\Delta C'$  от настройки параметров сети в составе ГРС

	$W_0$	$m$	$C$ , Мбит/с	Оптимальное значение $W_0'$	Оптимальное значение $m'$	Максимальное значение $C'_{\max}$ , Мбит/с	$\Delta m$	Выигрыш $\Delta C'$ , Мбит/с	Выигрыш $\Delta C'$ , %
Базовый механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ( $p_f = 0.1$ )									
N=63	16	6	3.26	512	1*	4.41	0	<b>1.15</b>	<b>35.3</b>
RTS/CTS механизм доступа, при наличии помех в радиоканале ( $p_f = 0.1$ )									
N=63	16	6	3.68	256	2*	4.29	0	<b>0.61</b>	<b>16.6</b>
* - значения являются оптимальными, по критерию максимума пропускной способности, при выполнении условия (ограничения): $2^{m'} \cdot W_0' \leq W_{\max}$ .									

Видно, что для сети из 63 элементов значения параметров  $W_0$ ,  $m$ , рекомендованные стандартом, являются далеко не оптимальными, при этом оптимизация параметров позволяет получить выигрыш по пропускной способности ( $\Delta C'$ ) до 1,15 Мбит/с для базового и до 0,6 Мбит/с для RTS/CTS механизмов доступа. Учитывая тот факт, что реальная суммарная пропускная способность беспроводного канала ГРС может составлять до 3 Мбит/с (таблица

4.1), то прогнозируемый профицит пропускной способности в существующих сетях магистральных ГРС составляет не более 7%. При этом, существующая потребность в повышении пропускной способности, связанная с наращиванием инфраструктуры сетей (увеличение количества датчиков и другого оборудования) составляет минимум 15-20%. Таким образом, применение механизма оптимизации параметров канального уровня, реализованного в модифицированном алгоритме распределенного доступа, позволит решить задачу модернизации существующих беспроводных сетей магистральных ГРС без дополнительных финансовых затрат, связанных с заменой радиооборудования на более производительное. Полученные результаты подтверждены актом их внедрения в проектной деятельности ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" (г. Воронеж).

#### **Выводы по главе:**

1. В данной главе, на основании проведенного анализа, показана актуальность задачи по модернизации существующего механизма DCF и разработке нового алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, учитывающего состояние загруженности элементов сети и обеспечивающего стабилизацию пропускной способности на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети. Данная актуальность определена исходя из следующих факторов:

- протоколам множественного случайного доступа (Aloha, S-Aloha, CSMA/CA и т.д.) свойственна бистабильность, которая заключается в спонтанном снижении производительности протокола при увеличении интенсивности поступающей нагрузки сверх некоторого максимального значения;

- в существующих методах доступа стандарта IEEE 802.11 (DCF, PCF) отсутствуют какие либо механизмы предотвращения перегрузок беспроводной сети и обеспечения выполнения требований QoS по пропускной способности.

2. Разработана методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загруженности элементов сети

(насыщенное и ненасыщенное состояние) и формирующая решающее правило по допуску в канал нового потока. Предлагаемая методика может быть использована как при проектировании новых систем беспроводного доступа, так и при повышении эффективности функционирования уже существующих систем.

3. С учетом разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 (глава 2), алгоритма настройки параметров канального уровня стандарта IEEE 802.11 (глава 3), методики оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала (п.п. 4.2), синтезирован модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях при высокой нагрузке в сети. Основной функциональной задачей разработанного алгоритма является повышение эффективности использования сетевых ресурсов стандарта 802.11 (повышение производительности сети) при выполнении требований QoS по пропускной способности для новых запросов и исключении перегрузки сети (стабилизации пропускной способности на максимальных значениях). Отличительной особенностью разработанного алгоритма (в сравнении с известными решениями [1]) является формирование дополнительных этапов передачи  $\Delta t$  для трафика требовательного к надежности передачи, а также в учете остаточной пропускной способности канала с дальнейшим принятием решения о допуске в канал нового потока (или отказе в обслуживании).

4. Проведено исследование основных свойств разработанного алгоритма: пошаговость (дискретность), детерминированность (определенность), массовость (универсальность), результативность, точность, сходимость, вычислительная сложность, устойчивость. Данное исследование показало соответствие разработанного алгоритма требованиям, предъявляемым к подобного класса алгоритмам.

5. Разработаны научно-технические предложения по практическому использованию (на примере магистральной ГРС) разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11.

## **ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА IEEE 802.11.**

### **5.1 Обоснование и выбор среды имитационного моделирования. Определение исходных данных и условий моделирования.**

Имитационное моделирование – это вид компьютерного моделирования, для которого характерно воспроизведение на ЭВМ (имитация) процесса функционирования исследуемой сложной системы. При этом имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени, что позволяет получить информацию о состоянии системы в заданные моменты времени. Имитационное моделирование в настоящее время является мощным инженерным методом исследования сложных систем, используемым в тех случаях, когда другие методы оказываются либо малоэффективными или затратными, либо для проверки точности и адекватности аналитических моделей [130, 131]. Имитационная модель представляет собой систему, отображающую структуру и процесс функционирования исходного объекта в виде алгоритма, связывающего входные и выходные данные, принятые в качестве характеристик исследуемого объекта [38]. Для проверки работоспособности и оценки эффективности, предлагаемых в диссертационной работе решений, было проведено имитационное компьютерное моделирование [130-132], основной целью которого являлось:

- проверка адекватности (верификация) разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне, с использованием одной из известных (и наиболее подходящей) систем имитационного моделирования (симулятора);

- оценка эффективности применения разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, с

использованием разработанной компьютерной программы имитационного моделирования;

- статистический анализ точности имитационного компьютерного моделирования (валидация данных имитационного моделирования);

- получение количественных показателей производительности моделируемой беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 с использованием разработанной программы.

В [74] отмечается важность правильного выбора среды (системы) моделирования (или языка программирования) при проведении имитационного компьютерного моделирования, так как эффективность разрабатываемых моделирующих программ в большей степени определяется возможностями таких сред (систем). Для обоснования выбора средства имитационного моделирования исследуемых процессов в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11 был проведен анализ основных наиболее распространённых систем моделирования. Были рассмотрены следующие хорошо известные системы имитационного моделирования (симуляторы):

**1. General Purpose Simulation System (GPSS)** [133]. Это система моделирования общего назначения, предназначенная для проведения исследования характеристик и поведения сложных систем с дискретным процессом их функционирования. Основные типы систем, которые могут быть представлены с помощью GPSS: системы и сети массового обслуживания, автоматные модели, сети Петри и подобные системы.

Одной из самых распространенных реализаций систем GPSS является система GPSS World, разработанная для ОС Windows. Среда GPSS World обладает широким набором инструментов для анализа результатов моделирования и позволяет получать зависимости основных характеристик, а также динамически управлять процессом моделирования. Также, в библиотеках среды имеется ряд различных вероятностных распределений для генераторов случайных функций, что позволяет описывать широкий спектр моделей поведения потоков данных, проходящих через моделируемые системы.



Недостатком данной системы является сложность представления процессов обработки данных на уровне алгоритмов. Кроме того, модель представляет собой программу, а значит, не имеет графической интерпретации, что затрудняет процесс разработки модели и снижает наглядность имитационной модели в целом.

**2. Network Simulator 2 (NS2)** [134]. Сетевой симулятор NS2 представляет собой программное средство для моделирования и анализа функционирования цифровых сетей с коммутацией пакетов. Он предназначен для оценки влияния различных факторов на эффективность разрабатываемых протоколов и приложений, а так же реализации конкретных протоколов и алгоритмов управления процессами в сетях. В зависимости от целей исследования, процессы в сети могут моделироваться на различных уровнях взаимодействия, с учетом особенностей традиционных и перспективных приложений, протоколов и технологий (WWW, Multicast, Mobile Networking, Satellite Networking, LAN и др.).

Недостатком данной системы является низкая производительность, вследствие моральной старости средства, а так же ограниченная масштабируемость.

**3. OMNeT++** [135]. Представляет собой систему моделирования на основе дискретных событий. Система моделирования в основном поддерживает стандартные проводные сети IP-коммуникаций, но существуют также некоторые расширения для беспроводных сетей. Как и NS2, OMNeT ++ является известной системой, расширяемой и активно поддерживаемой сообществом пользователей. OMNeT++ использует язык C++ для реализации имитационных моделей. Симулятор имеет графические инструменты для создания моделей и оценки результатов в режиме реального времени.

Недостатком данной системы является разобщённая разработка, что приводит к трудностям работы с различными модулями системы. Так же отдельные симуляторы на основе OMNeT++ ограничены функционально.

**4. Network Simulation 3 (NS3)** [136]. Данный программный эмулятор позволяет исследовать сети передачи данных различных топологий и

конфигураций, оценивать их производительность, генерировать различные виды нагрузки на элементы сети и получать основные характеристики, исследуемого канала. Основными особенностями симулятора NS3 являются:

- а) ориентирован на программирование в C++ и Python;
- б) поддержка внешних средств визуализации исследуемого процесса и интеграция со сторонним программным обеспечением;
- в) современная архитектура реализации и набор верифицированных моделей.

Недостатком данной системы является ограниченная библиотека имеющихся моделей и существенная сложность в реализации пользовательских приложений.

**5. OpNet (релиз RiverBed Modeler) [137].** Представляет собой средство для создания, моделирования и изучения сетей связи, в том числе и беспроводных сетей различных стандартов. Позволяет анализировать воздействия приложений типа клиент-сервер и новых технологий на работу сети; моделировать иерархические сети, многопротокольные локальные и глобальные сети с учетом алгоритмов маршрутизации; осуществлять оценку и анализ производительности смоделированных сетей. Также с помощью данной среды можно осуществить проверку и анализ взаимодействий протоколов связи, оптимизацию и планирование сети.

RiverBed Modeler позволяет строить модели без программирования. При этом генерируется модель сети на основе исходных данных: о ее топологии и используемых протоколах, об интенсивностях потоков запросов между элементами сети, протяженности линий связи, о типах используемого оборудования и приложений.

Недостатком данной системы является ее закрытое ядро, что усложняет самостоятельную реализацию моделей.

На основе проведенного анализа наиболее подходящим средством для проведения имитационного моделирования, в рамках диссертационного исследования, является средство RiverBed Modeler. Данный программный

эмулятор позволяет исследовать сети передачи данных различных топологий и конфигураций, оценивать их производительность, генерировать различные виды трафиковой нагрузки на элементы сети и получать основные показатели производительности сети. Из проанализированных сред имитационного моделирования, именно RiverBed Modeler позволяет более полно и точно оценить работоспособность и адекватность разработанной модели.

При проведении имитационного моделирования в среде Riverbed Modeler была построена сеть из 50 станций ( $n = 50$ ) и одной точки доступа, объединенных в одном беспроводном домене, работающих по средствам стека протоколов TCP/IP и эмулирующих работу элементов сети. Исследуемым протоколом стал IEEE 802.11b с механизмом доступа к каналу передачи данных DCF. В качестве метода передачи на физическом уровне был выбран метод DSSS.

При моделировании в среде Riverbed Modeler использовались компоненты из набора *wireless\_lan\_adv* среды моделирования. В результате, была построена беспроводная сеть, изображенная на рисунке 5.1. Радиус действия построенной беспроводной сети был определен в среднем 50 м. Время проведения эксперимента – 10 минут. По результатам моделирования (эксперимента) формировались временные выборки длительностью 100 с, которые в дальнейшем усреднялись, с целью получения средних значений показателей производительности моделируемой беспроводной сети.

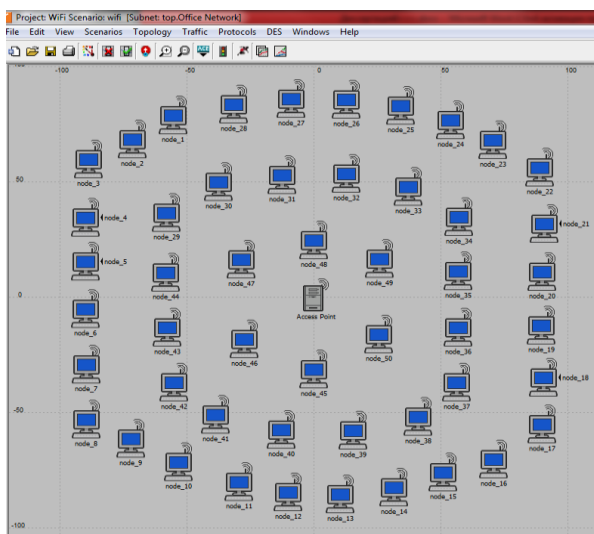
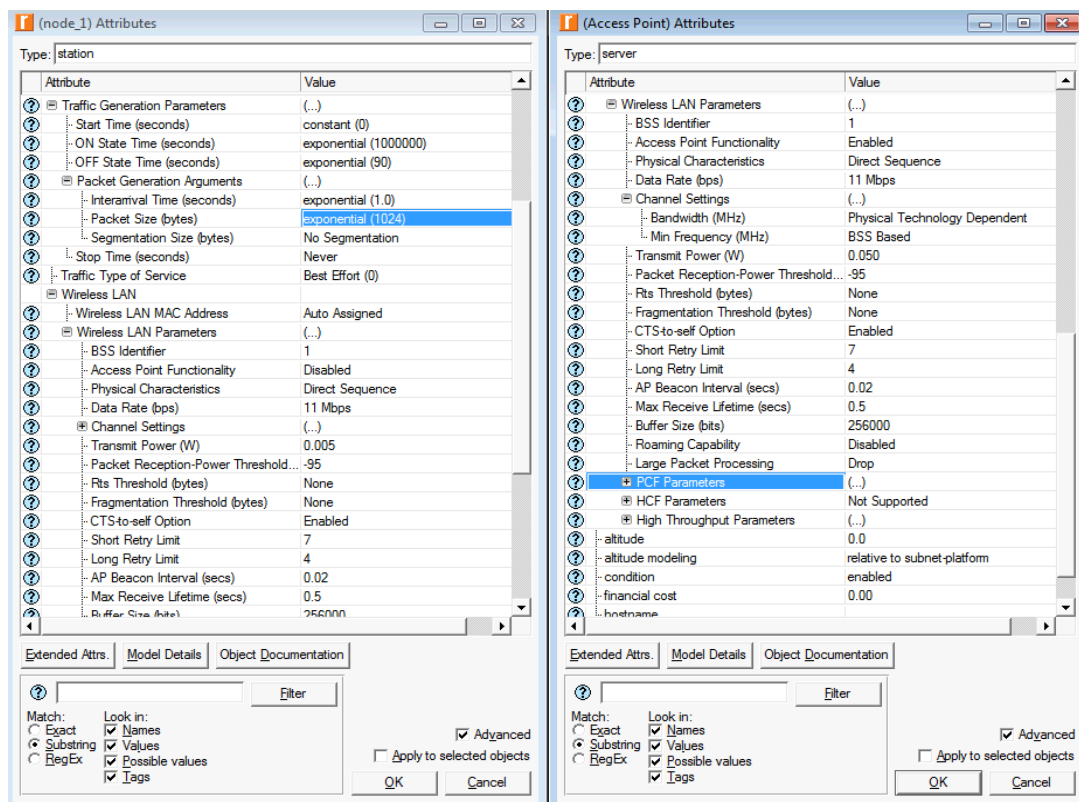


Рисунок 5.1 – Беспроводная сеть стандарта IEEE 802.11 b, построенная в среде Riverbed Modeler

Основные параметры стандарта IEEE 802.11b, используемые при проведении имитационного моделирования, были приведены в таблице 2.1 (глава 2). Пример настройки параметров беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b показан на рисунке 5.2.



а)

б)

Рисунок 5.2 – Настройки компонентов беспроводной сети: а) конечного устройства сети, б) точки доступа

## 5.2 Верификация разработанной математической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале

Верификация (оценка адекватности) разработанной математической модели была произведена путём сравнения полученных с помощью неё численных результатов (п.п. 2.5) с результатами имитационного моделирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b в среде RiverBed Modeler (рисунок 5.1). При этом необходимо отметить, что наилучшим решением для проверки

адекватности разработанной математической модели, конечно, было бы сравнение результатов аналитических расчетов с соответствующими показателями реально функционирующей сети связи. Однако такой подход весьма затруднителен и не всегда возможен. Поэтому наиболее рациональным решением является имитационное компьютерное моделирование.

При проведении имитационного моделирования, с целью корректности сравнения полученных результатов, некоторые параметры аналитической модели ( $\Delta m$ ,  $q_k$ ,  $p_f$ ) были приведены в соответствии с условиями моделирования в среде Riverbed Modeler. Численные данные и их графические зависимости на основе аналитических соотношений, представленных в главе 2, были получены с помощью системы компьютерной математики Mathcad.

Также при проведении имитационного моделирования в качестве модели станции сети стандарта IEEE 802.11 (с точки зрения характера поступления заявок на обслуживание) была выбрана СМО типа М/М/1, что позволяет гарантировать ненасыщенное состояние беспроводной сети, за счет варьирования показателем интенсивности поступления пакетов  $\lambda_k$  и связанной с ней вероятностью пустой очереди  $k$ -го элемента сети  $q_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ).

В разработанной аналитической модели процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 учитывается параметр количества дополнительных этапов передач пакета  $\Delta m$ . Однако данный параметр не предусмотрен в протоколе IEEE 802.11b. Поэтому, при моделировании параметр  $\Delta m$  был принят равным нулю ( $\Delta m = 0$ ). При таком условии модель описывает работу протокола IEEE 802.11b в обычных условиях функционирования, что позволяет произвести корректное сравнение результатов математического и имитационного моделирования.

Также в разработанной модели учитывается вероятность повреждения передаваемого пакета  $p_f$  в результате воздействия помех или других различных явлений радиоканала, например, многолучевого распространения. Для корректного сравнения аналитической модели с имитационной, показатель  $p_f$  был

принят равным нулю, то есть полагаем, что на данном этапе моделирования канал считается идеальным.

Моделирование проводилось как для базового, так и для RTS/CTS механизмов доступа протокола IEEE 802.11b. Для верификации модели были сформированы две группы параметров, представленных в таблице 5.1. При этом комплексное тестирование разработанной аналитической модели проводилось при различных значениях параметров протокола IEEE 802.11b. При верификации модели оценивалась зависимость пропускной способности сети от количества работающих в ней станций. Характер и численные значения данной зависимости, полученные с помощью разработанной аналитической модели, были подробно проанализированы в п.п. 2.5 (рисунок 2.9). Результаты сравнения аналитического и имитационного моделирования для базового и RTS/CTS механизмов доступа представлены на рисунках 5.3 и 5.4 соответственно.

Таблица 5.1 – Группы параметров моделирования

Группа параметров №1			Группа параметров №2		
	Базовый	RTS/CTS		Базовый	RTS/CTS
$W_0$	16	16	$W_0$	512	256
$m$	6	6	$m$	1	2
$\lambda / \mu = 30$			$\lambda / \mu = 30$		
$W_{\max} = 1024$			$W_{\max} = 1024$		
$\Delta m = 0$			$\Delta m = 0$		
$p_f = 0$			$p_f = 0$		

Анализ зависимостей пропускной способности сети от числа ее элементов, полученных с помощью имитационного моделирования, подтверждают выводы, сделанные в п.п. 2.5, а именно:

- при небольшой нагрузке в сети и небольшом количестве станций (меньше 10) пропускная способность сети резко возрастает с увеличением числа станций;
- при дальнейшем увеличении числа станций пропускная способность сети снижается для базового механизма доступа и практически стабилизируется для RTS/CTS режима;

- применение базового механизма доступа дает выигрыш по пропускной способности при небольшом числе станций. При числе станций более 20 выгодным становится применение RTS/CTS режима.

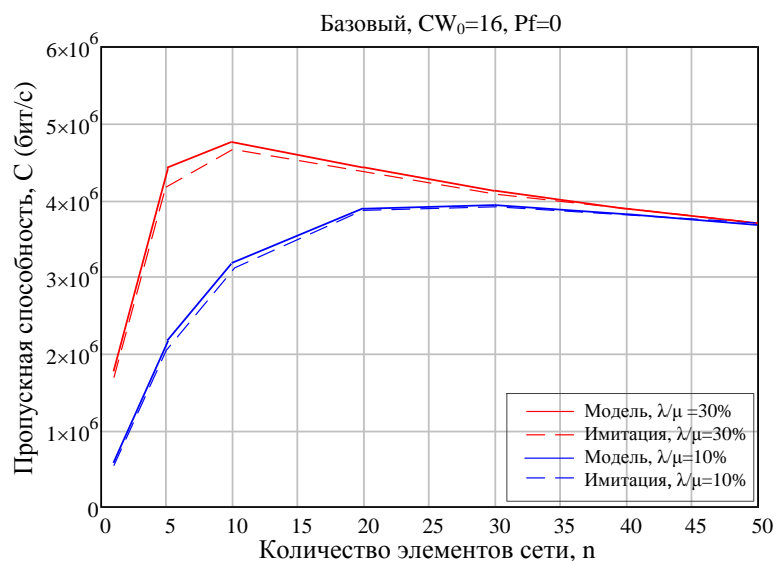


Рисунок 5.3 – Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования в базовом режиме доступа

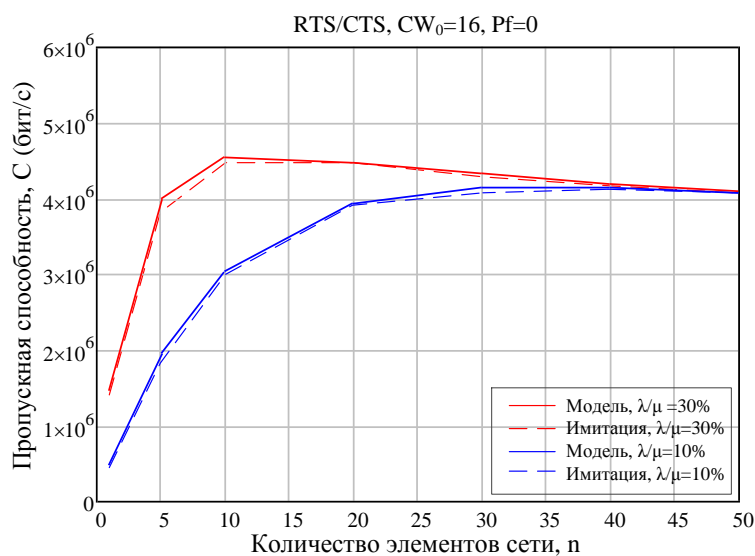


Рисунок 5.4 – Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования в режиме доступа RTS/CTS

С целью количественной оценки соответствия результатов аналитического и имитационного моделирования необходимо определить относительную погрешность расчетных показателей производительности беспроводной сети по

сравнению с экспериментальными (имитационными) в соответствии со следующей формулой [119]:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{N_{им}} \frac{\sum_{j=1}^{N_{ам}} |Z_{AM_j} - Z_{ИМ_j}|}{Z_{AM_j}}}{N_{AM}} \cdot 100\% , \quad (5.1)$$

где  $N_{AM}$  – количество аналитических расчетов;  $N_{ИМ}$  – количество имитационных экспериментов;  $j = 1 \dots N_{AM}$ ,  $i = 1 \dots N_{ИМ}$ ,  $Z_{AM_j}$ ,  $Z_{ИМ_j}$  – совокупность показателей производительности беспроводной сети (пропускная способность, время передачи и количество потерянных пакетов), полученных в результате аналитических расчетов и имитационных экспериментов.

Сравнительный анализ полученных результатов аналитического и имитационного моделирования на количественном уровне показал, что относительная погрешность  $\delta$  полученных результатов для базового механизма доступа составила 8,06%, а для механизма RTS/CTS составила 7,62%, что позволяет сделать вывод о высоком соответствии результатов полученных с помощью разработанной математической модели результатам проведенного имитационного моделирования.

Также был проведен сравнительный анализ результатов аналитического моделирования с результатами исследований, полученных в [42, 71, 38] для условий насыщенного состояния сети. Сравнительный анализ (в равных условиях моделирования) в режиме максимальной нагрузки ( $\lambda/\mu = 1$ , то есть  $q_k = 0$ ) показал схожесть полученных результатов с результатами исследований [42, 71, 38], как по характеру зависимостей, так и по порядку численных значений, что дополнительно указывает на адекватность разработанной аналитической модели.

Таким образом, разработанная в диссертационной работе математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 в ненасыщенном состоянии и при наличии помех в радиоканале доказала свою адекватность при проведении имитационного моделирования.



### **5.3 Оценка эффективности применения разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11**

Разработанный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки на практике может быть реализован в точке доступа, которая осуществляет сбор текущей информации о сетевом трафике, осуществляет расчет оптимальных (по критерию максимума пропускной способности) параметров канального уровня, вычисляет ненасыщенную и насыщенную пропускную способность сети и принимает решение о приеме новых запросов на обслуживание, на основе анализа соответствия остаточной пропускной способности сети требованиям поступившего запроса. Отметим, что выбранная среда имитационного моделирования Riverbed Modeler (как и большинство других сред) не позволяет изменять (разрабатывать новые) алгоритмы функционирования элементов беспроводной сети конкретного стандарта. В связи с этим, для оценки эффективности применения синтезированного алгоритма была разработана компьютерная программа имитационного моделирования протокола канального уровня сети передачи данных стандарта IEEE 802.11. Средством разработки был выбран язык программирования C++. За основу была взята модель [42], реализованная в среде Matlab, которая была доработана с учетом всех процедур разработанного алгоритма распределенного доступа. Полученная в результате программная модель близко следует всем деталям стандарта IEEE 802.11 для каждой независимо передающей станции сети и при этом реализует разработанный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта 802.11. Каждая станция в программе представляется самостоятельным объектом, и характеризуется следующими основными параметрами: скорость передачи (определяет параметр  $C_{mp}$ ); длина пакета, который находится в очереди на передачу; число попыток передачи этого пакета; число виртуальных слотов,

оставшееся станции до очередной попытки передачи (счетчик случайной задержки – backoff).

С использованием разработанной программы было проведено моделирование процесса функционирования беспроводной сети, реализующей разработанный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта 802.11. При моделировании значение требуемой пропускной способности (параметр  $C_{mp}$ ) для каждого элемента сети выбиралось произвольно с равномерным распределением в диапазоне 100–500 Кбит/с. Также при моделировании предполагалось, что в канале могут присутствовать помехи, воздействие которых приводит к искажению передаваемых пакетов, что в свою очередь требует повторной передачи таких пакетов. При этом учет влияния помех на производительность беспроводной сети в разработанной программе осуществляется за счет введения вероятности повреждения пакета помехой  $p_f$ , которая связана с вероятностью битовой ошибки  $BER$ . При моделировании длина пакета  $L_p$  выбиралась произвольно с равномерным распределением в диапазоне  $\{1...2300\}$  байт. Показатель  $BER$  был принят равным  $5 \cdot 10^{-5}$ . При этом выбор пакета поврежденного помехой осуществлялся произвольно с помощью датчика случайных чисел и в соответствии с заданной вероятностью  $p_f$ . Также при моделировании учитывался параметр количества дополнительных этапов передач пакета  $\Delta t$  для трафика требовательного к надежности передачи. Параметр  $\Delta t$  определялся в соответствии с методикой, изложенной в главе 2 (напомним, что при моделировании в среде Riverbed Modeler данный параметр суммировался с количеством попыток передачи  $m$ , так как среда моделирования не позволяет учесть дополнительные попытки передачи). При моделировании оптимизатор параметров канального уровня  $W_0'$  и  $m'$  был включен, то есть работал оптимизационный алгоритм, описанный в главе 3. Моделирование проводилось для следующих комбинаций режимов: {базовый режим, без использования алгоритма}; {базовый режим, с использованием алгоритма}; {RTS/CTS, без использования алгоритма}; {RTS/CTS, с использованием алгоритма}.

На рисунках 5.5 – 5.7 показаны примеры усредненных временных выборок по пропускной способности, задержке передач данных и соотношению потерянных пакетов, полученных для базового и RTS/CTS механизмов с использованием разработанного алгоритма распределенного доступа и без него. Представленные зависимости получены по усредненным показателям временных выборок длительностью 100 секунд.

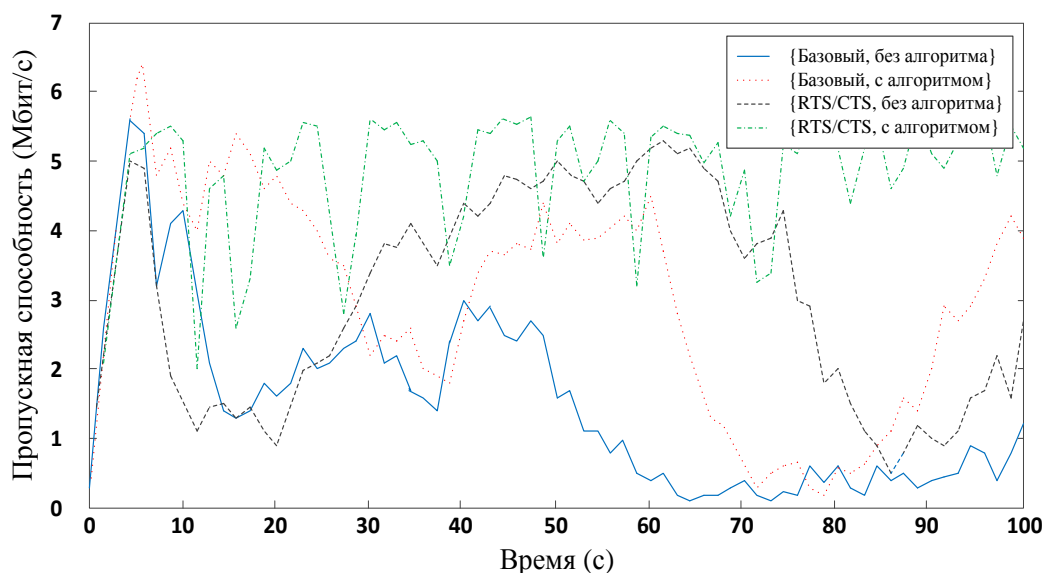


Рисунок 5.5 – Пример зависимости пропускной способности во временной области моделирования

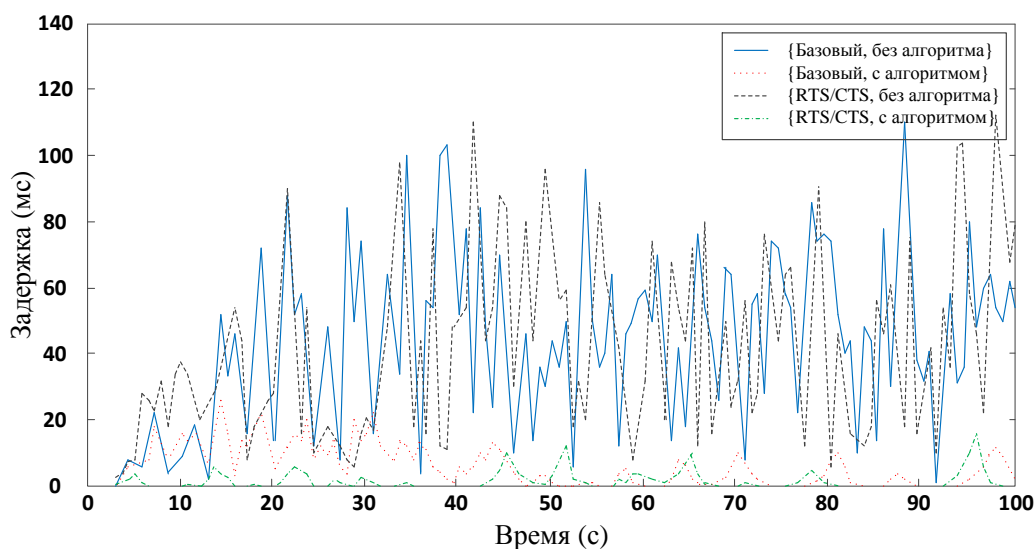


Рисунок 5.6 – Пример зависимости времени задержки передачи пакетов во временной области моделирования

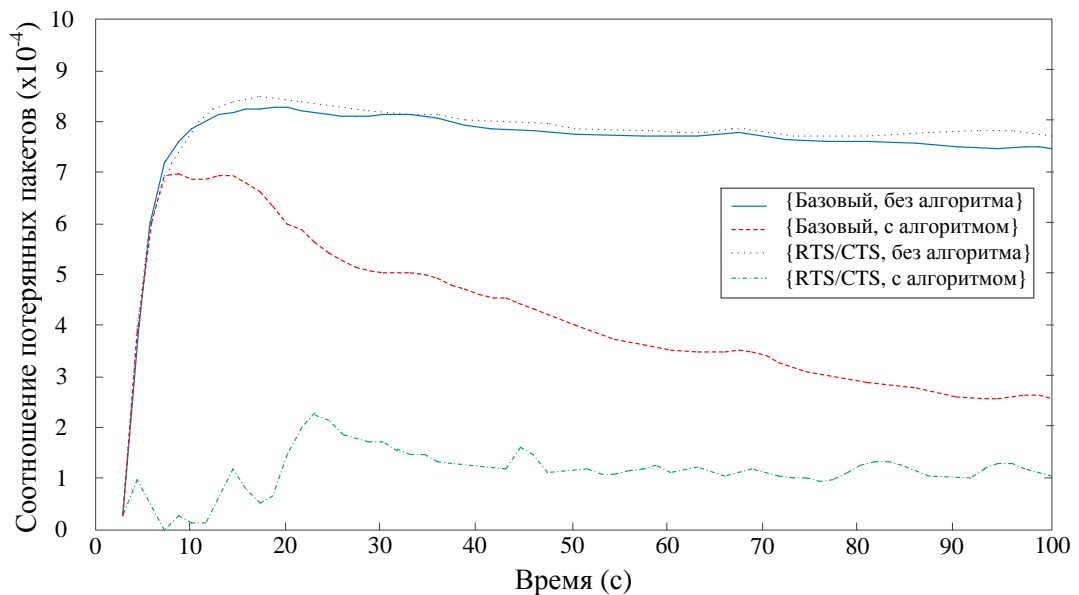


Рисунок 5.7 – Пример зависимости количества потерянных пакетов во временной области моделирования

На рисунках 5.8 – 5.10 показаны полученные усредненные зависимости пропускной способности, задержки и числа потерянных пакетов от интенсивности поступления пакетов.

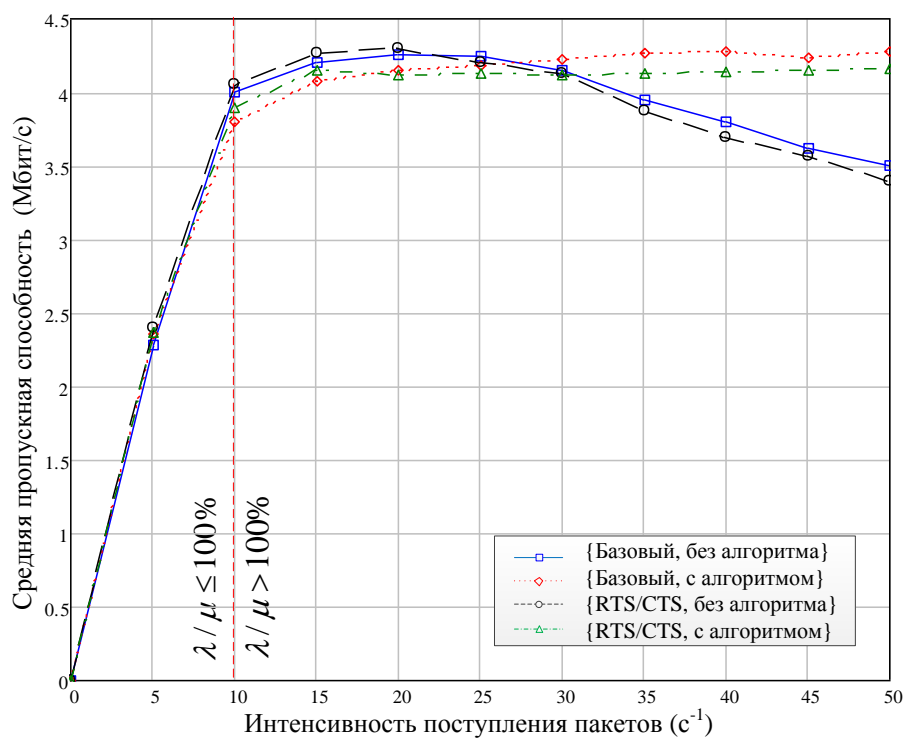


Рисунок 5.8 – Пример зависимости средней пропускной способности от интенсивности поступления пакетов

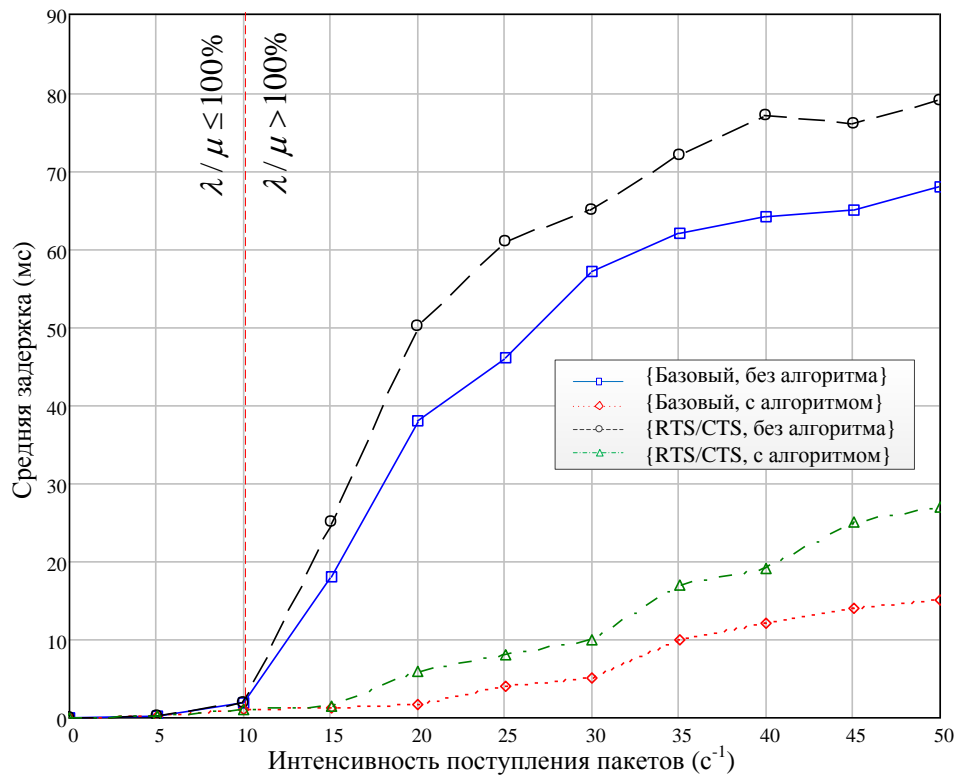


Рисунок 5.9 – Пример зависимости средней задержки пакета от интенсивности поступления пакетов

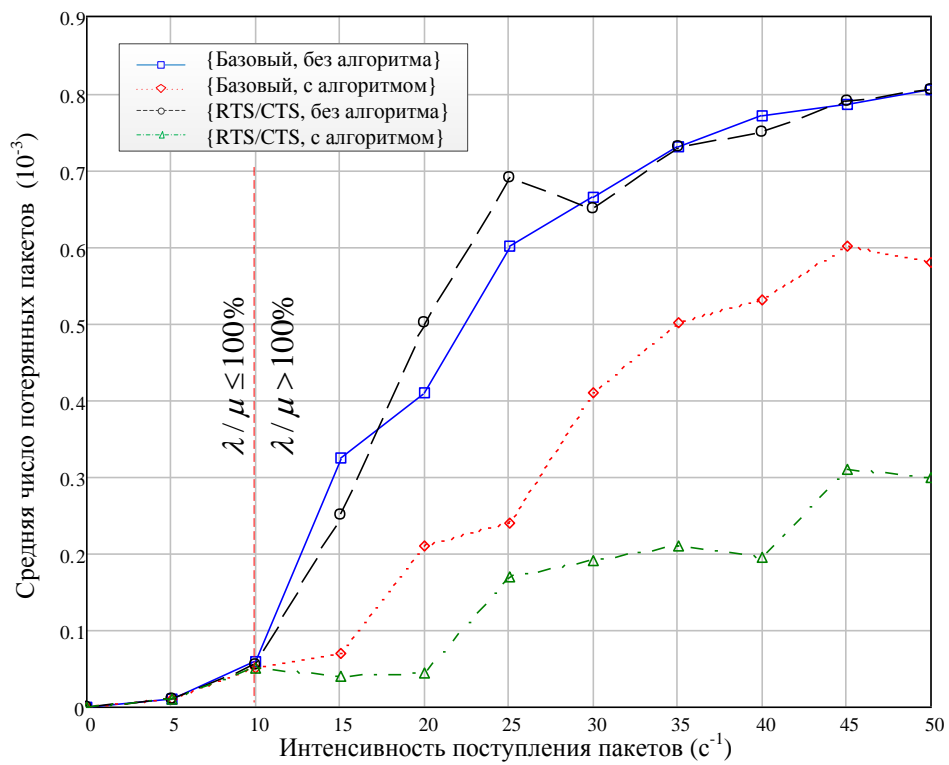


Рисунок 5.10 – Пример зависимости среднего числа потерянных пакетов от интенсивности поступления пакетов

Анализ полученных результатов показал, что:

1. В более 90% наблюдаемого интервала времени, применение разработанного алгоритма распределенного доступа повышает пропускную способность сети, как в базовом, так и RTS/CTS режимах, по сравнению с режимами не использующими его (рисунок 5.5).

2. Средняя пропускная способность для следующих рассматриваемых вариантов составила: {базовый режим, без использования алгоритма} – 3,28 Мбит/с, {базовый режим, с использованием алгоритма} – 4,68 Мбит/с, {RTS/CTS, без использования алгоритма} – 3,84 Мбит/с, {RTS/CTS, с использованием алгоритма} – 4,621 Мбит/с (рисунок 5.5).

3. Средняя задержка при передаче пакетов для рассматриваемых вариантов составила: {базовый режим, без использования алгоритма} – 42,65 мс, {базовый режим, с использованием алгоритма} – 6,18 мс, {RTS/CTS, без использования алгоритма} – 60,73 мс, {RTS/CTS, с использованием алгоритма} – 9,35 мс (рисунок 5.6).

4. Среднее значение потерь пакетов с применением разработанного алгоритма распределенного доступа (для базового и RTS/CTS механизмов доступа) стало в среднем на 25% меньше, чем без его применения (рисунок 5.7).

5. Зависимость пропускной способности сети с увеличением интенсивности входного потока (рисунок 5.8), когда алгоритм не используется, ведет себя неустойчиво как в базовом режиме, так и в режиме RTS/CTS. При использовании разработанного алгоритма такая зависимость более стабильна. Однако при небольшой нагрузке для режимов {базовый режим, без использования алгоритма} и {RTS/CTS, без использования алгоритма} среднее значение пропускной способности несколько ниже, нежели для режимов с использованием алгоритма. Это можно объяснить тем, что при небольшой нагрузке, режимы работы без использования алгоритма легко справляются с обслуживанием входного потока (тем самым и достигается немного большая пропускная способность), однако с увеличением нагрузки, в сети увеличивается число коллизий и как следствие снижается пропускная способность. При этом в режимах с использованием

разработанного алгоритма наблюдается стабилизация пропускной способности на уровне максимальных значений при превышении нагрузки некоторого порогового значения ( $\lambda / \mu > 100\%$ ).

6. Средние значения задержки пакетов с увеличением интенсивности входного потока сначала медленно растут, что соответствует периоду ненасыщенного состояния канала, а затем, в течении некоторого переходного периода, резко возрастают и практически полностью стабилизируются достигнув некоторых предельных значений, соответствующих насыщенному состоянию канала, то есть состоянию максимальной нагрузки (рисунок 5.9). При этом резкий рост задержки пакетов с увеличением интенсивности входного потока наблюдается в режимах без использования разработанного алгоритма: ({базовый режим, без использования алгоритма} и {RTS/CTS, без использования алгоритма}). В режимах с использованием разработанного алгоритма эффект в снижении значений задержки пакетов (в сравнении с режимами без использования алгоритма) отчетливо проявляется с некоторого порогового значения создаваемой в сети нагрузки, соответствующего нижнему граничному значению переходного интервала нагрузки между ненасыщенным и насыщенным состоянием канала.

7. Средние значения показателя потерь пакетов с увеличением интенсивности входного потока (рисунок 5.10) резко возрастают в режимах без использования разработанного алгоритма. В режимах с использованием разработанного алгоритма эффект в снижении значений показателя потерь пакетов (в сравнении с режимами без использования алгоритма) отчетливо проявляется с некоторого порогового значения создаваемой в сети нагрузки, которое также, как и в случае с задержкой пакетов, соответствует нижнему граничному значению переходного интервала нагрузки между ненасыщенным и насыщенным состоянием канала.

Проведенный анализ позволил сформировать решающие правила (критерии) использования разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11:

1. Если требуется максимальная производительность сети по показателю пропускной способности, то запуск алгоритма целесообразно осуществлять при возрастающей нагрузке, начиная с некоторого порогового значения, которое может быть оценено статистически.

2. Если требуется максимальная надежность передачи данных или передаваемый трафик критичен к задержкам, то есть необходимо выполнение требований по максимально допустимым значениям потерь пакетов или времени их задержки соответственно, то алгоритм целесообразно использовать постоянно.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение разработанного алгоритма распределенного доступа позволяет повысить производительность сети в целом, как в базовом режиме работы, так и в режиме RTS/CTS. При этом производится учёт требований QoS к передаваемым данным по пропускной способности, что позволяет качественно функционировать поддерживающие их сервисы.

#### **5.4 Статистический анализ точности моделирования (валидация данных имитационного моделирования) процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 с учетом процедур разработанного алгоритма распределенного доступа**

Валидация данных имитационной модели предполагает исследование ее основных свойств, в ходе которого осуществляется оценка точности, устойчивости, чувствительности результатов моделирования [130, 131]. Наиболее существенной процедурой исследования свойств имитационной модели является оценка точности результатов моделирования [130, 131]. Для определения точности результатов имитационного моделирования необходимо оценить доверительные интервалы для истинных значений контролируемых параметров (пропускной способности и времени задержки) с заданным (требуемым) коэффициентом доверия (доверительной вероятностью) [130, 131]. Однако для оценки доверительного интервала необходимо знать дисперсию случайной



величины (оцениваемого параметра), которую можно получить, зная закон ее распределения.

По результатам работы имитационной компьютерной модели формируются массивы статистических данных значений пропускной способности и времени обработки пакета (задержки) на МАС-уровне в моделируемой сети стандарта 802.11. Данные одного имитационного прогона представляют собой единичную выборку, т.е. результаты прогонов на имитационной модели могут рассматриваться как случайные величины  $a$ , следовательно, для их оценки могут быть применены правила математической статистики. Необходимо отметить, что оценка единичной выборки с определенной вероятностью позволяет судить о границах генеральной выборки, сделать некоторые предположения об отдельных параметрах случайной величины, таких, как математическое ожидание и дисперсия. Но при этом нельзя сделать вывод о характере распределения случайной величины. Полную характеристику случайной величины дает закон ее распределения. Однако об этом законе в генеральной совокупности можно получить информацию только из частичных выборок. Поэтому необходимо иметь критерии оценки соответствия статистических законов распределения, полученных из частичных выборок, теоретическим законам распределения, характеризующим генеральную совокупность. Такими критериями являются критерии согласия [138, 139]. Наиболее известны критерии согласия Пирсона, Колмогорова и Смирнова [138, 139]. Данные критерии основываются на проверке выдвигаемых статистических гипотез, которые в свою очередь являются предположениями о виде неизвестного закона распределения или о параметрах известных распределений. Проверить статистическую гипотезу – значит проверить, согласуются ли выборочные данные с выдвинутой гипотезой. При этом проверка статистических гипотез сопряжена с возможностью допустить ошибку:

- первого рода – состоит в том, что будет отвергнута верная гипотеза;
- второго рода – состоит в том, что будет принята ложная гипотеза.

Вероятность совершения ошибки первого рода обозначается  $\alpha$  и называется уровнем значимости [138, 139].

Учитывая большой объем статистических данных в каждой единичной выборке, получаемой на выходе имитационной модели, целесообразно использовать критерий согласия Пирсона [138, 139]. Данный критерий широко используется в задачах статистического анализа данных для проверки соответствия экспериментальных данных заданному модельному непрерывному или дискретному закону распределения, определяемому функцией распределения  $F(x)$ .

Методика проверки по критерию согласия Пирсона опытного распределения с теоретическим сводится к следующим этапам:

1. Формируется совокупность выборочных значений (вариационный ряд)  $\xi: \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$  ( $i=1..n$ ). Из совокупности  $\xi$  выбирается случайная выборка объемом  $n$ , которая разбивается на  $r$  интервалов:  $S_1, S_2, \dots, S_r$ .

*Примечание.* При этом необходимо, чтобы  $r > 7$ , каждый интервал  $S_r$  содержал не менее 5 выборочных значений. Интервалы могут иметь различную длину.

2. Из выборочных данных формируются оценки параметров (математического ожидания и дисперсии) экспериментального распределения. Устанавливается число степеней свободы  $k=r-l-1$  ( $l$  – число параметров предполагаемого распределения, которые могут быть оценены по данным выборки).

3. Формируется гистограмма распределения выборочных данных, по виду которой делается вывод о предполагаемом распределении случайной величины.

4. Формулируется проверяемая гипотеза, путем выбора теоретического распределения случайной величины, согласие которого с опытным распределением этой величины следует проверить.

5. Устанавливается уровень значимости  $\alpha$ , в соответствии с которым (для предполагаемого теоретического распределения) определяется критическая

область  $\chi_{кр}^2$ .

4. Определяются для каждого интервала  $S_r$  частоты эмпирического  $m_i$  и теоретического  $m_i^T$  распределений ( $i = 1..n$ ).

5. Рассчитывается значение критерия согласия Пирсона  $\chi_{набл}^2$ . Если  $\chi_{набл}^2 < \chi_{кр}^2$ , то гипотеза при данном уровне значимости  $\alpha$  не противоречит предполагаемому виду распределения. Если  $\chi_{набл}^2 > \chi_{кр}^2$ , то гипотеза о данном виде распределения должна быть отклонена.

В соответствии с данной методикой осуществим проверку выборок значений пропускной способности, формируемых имитационной моделью в результате каждого прогона (запуска). Формируемые массивы  $\xi$  включают  $n$  значений анализируемых параметров:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и есть основания полагать, что результаты распределены нормально с плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (5.2)$$

При этом параметры закона распределения  $m$  и  $\sigma$  неизвестны. Вместо неизвестных параметров можно использовать значения их оценок, которые могут быть определены в соответствии со следующими выражениями:

$$m^* = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2}. \quad (5.4)$$

Тогда критерий согласия Пирсона может быть определен как:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(m_i - m_i^T)^2}{m_i^T}, \quad (5.5)$$

где  $r$  – число интервалов, на которые разбито выборочное распределение;

$m_i$  – частоты эмпирического распределения;

$m_i^T$  – частоты теоретического распределения.

Из выражения (5.5) видно, что критерий характеризует близость эмпирического и теоретического распределений: чем меньше различаются  $m_i$  и  $m_i^T$ , тем меньше значение  $\chi^2$ . Доказано, что при  $m \rightarrow \infty$  закон распределения случайной величины (5.5) независимо от того, какому закону распределения подчинена генеральная совокупность, стремится к закону распределения  $\chi^2$  с  $k$  степенями свободы [138, 139]. Для нормального распределения оцениваются два параметра (математическое ожидание и дисперсия), поэтому  $k = r - 3$ . В соответствии с процедурой проверки гипотезы следует вычислить наблюдаемое значение критерия. Чтобы вычислить частоты эмпирического распределения весь интервал наблюдаемых значений разделим на  $r$  частичных интервалов:  $S_1, S_2, \dots, S_r$ .

Частоты эмпирического распределения  $m_i$  определяются путем подсчета числа значений выборки, которые попадают в  $i$ -ый интервал. Используя теоретический закон распределения (5.2) можно рассчитать ожидаемое число  $m_i^T$  для каждого интервала как:

$$m_i^T = n \cdot p_i, \quad (5.6)$$

где  $p_i$  – вероятность того, что результат одного измерения попадает в соответствующий  $i$ -ый интервал.

Определим уровень значимости  $\alpha=0,01$  и построим гистограммы распределения выборок (вариационные ряды) для базового режима доступа с использованием разработанного алгоритма и без него. Примеры гистограмм выборок значений пропускной способности и их аппроксимация, построенные в среде Matlab, представлены на рисунке 5.11.

В таблице 5.2 представлены результаты расчетов параметров (статистических характеристик) анализируемых выборок (по показателю пропускной способности), с использованием которых можно перейти к определению доверительного интервала для средних значений анализируемых параметров, а также определению требуемого объема статистических данных на

выходе имитационной модели для достижения требуемого значения точности и достоверности результатов.

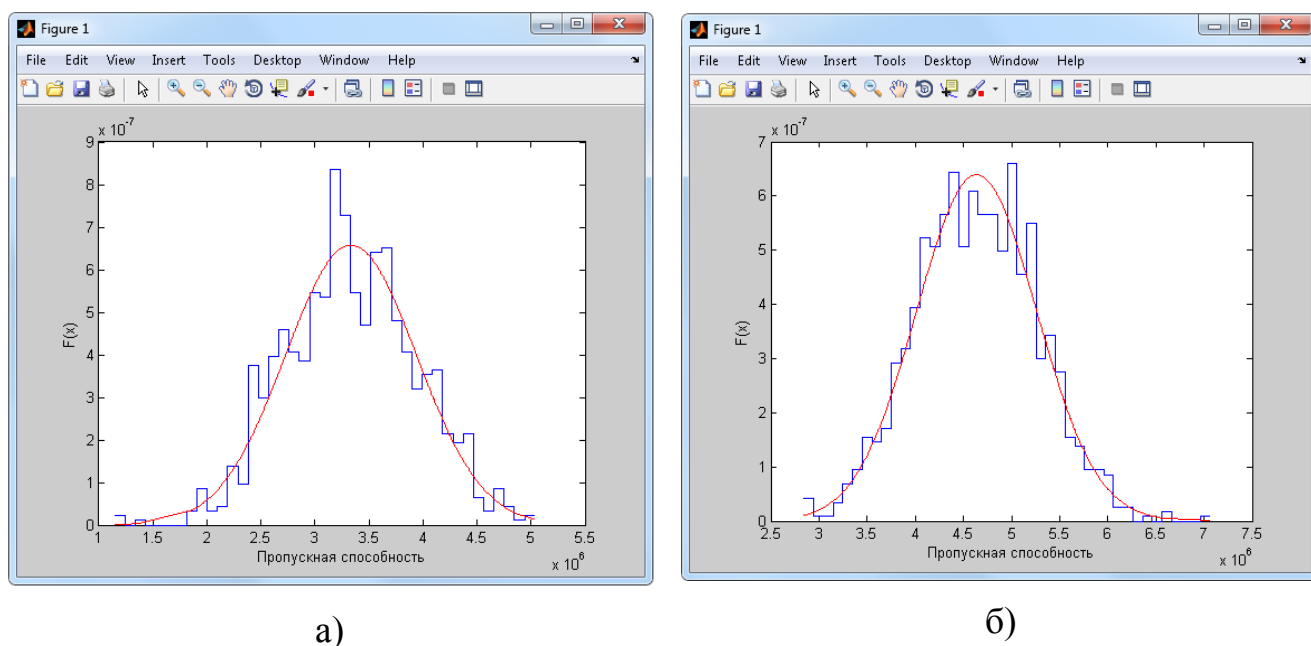


Рисунок 5.11 – Примеры гистограмм распределений значений пропускной способности анализируемой выборки для базового механизма доступа ((а) – без использования разработанного алгоритма; (б) – с использованием алгоритма)

Таблица 5.2 – Статистические характеристики анализируемых выборок по показателю пропускной способности

Режим работы	Объем выборки, $N_{имм.}$	Мат. ожидание, $m[x]$ , бит/с	СКО, $\sigma_x$ бит/с	Дисперсия, $D_x$ , бит/с	$\chi^2_{набл}$	$\chi^2_{кр}$
{базовый режим, без использования алгоритма}	29317	3284126	531	282126	59,428	66,339
{базовый режим, с использованием алгоритма}	35967	4681972	562	315602	62,527	66,401
{RTS/CTS, без использования алгоритма}	21964	3846183	505	255412	53,896	64,011
{RTS/CTS, с использованием алгоритма}	24035	4621467	519	268994	52,302	64,019

От объема статистических данных зависит адекватность полученных распределений контролируемых параметров (порядок определения которых рассмотрен выше), поэтому определение и выбор размера статистической выборки при имитационном моделировании является весьма важной задачей. В общем случае существуют два подхода (метода) к решению данной задачи - с использованием предварительных и итерационных вычислений. Первым методом определения объема выборки  $N$ , обеспечивающего заданную точность и достоверность полученного результата, является алгоритм, использующий центральную предельную теорему теории вероятности. При большом числе реализаций  $N$  полученные результаты имитационного моделирования приобретают статистическую устойчивость и с достаточной степенью точности могут быть приняты в качестве истинных характеристик функционирования рассматриваемой имитационной модели. Для рассматриваемых выходных параметров имитационной модели  $x$  вероятность их нахождения  $P$  в пределах доверительного интервала  $[a, b]$  при большом объеме выборки  $N$  определяется следующим выражением [140]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_{N \rightarrow \infty} \left\{ a < \left( \frac{\sum_{i=1}^N u_i - N \cdot m[u]}{\sqrt{N} \cdot \sigma_u} \right) < b \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{t^2}{2}} = \Phi^*(b) - \Phi^*(a), \quad (5.7)$$

где  $u_i = \frac{x_i - m[x]}{\sigma_x}$  - приведенная случайная величина  $x_i$  рассматриваемой выборки объема  $N$  со значениями математического ожидания  $m[x]$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$ ;  $m[u]$ ,  $\sigma_u$  - приведенное математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины  $x_i$ ,  $\Phi^*(x)$  - интегральная функция Лапласа.

При большом числе испытаний  $N$  справедливо приближенное равенство [140]:

$$P\left|\bar{u} - m[u] \leq \frac{Z_{1-a/2} \cdot \sigma_u}{\sqrt{N}}\right| \approx 2 \cdot \Phi^*(Z_{1-a/2}) = P_{[a,b]}, \quad (5.8)$$

где  $\bar{u} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u_i$  - среднееарифметическое значение приведенной случайной величины,  $Z_{1-a/2}$  - квантиль нормального закона распределения,  $P_{[a,b]}$  - доверительная вероятность.

Погрешность оценки  $\bar{u}$  может быть определена как:

$$E = \frac{Z_{1-a/2} \cdot \sigma_u}{\sqrt{N}}. \quad (5.9)$$

Тогда требуемое число реализаций  $N$  с доверительной вероятностью  $P_{[a,b]}$  может быть определено как:

$$N = \left( \frac{Z_{1-a/2} \cdot \sigma_u}{E} \right)^2. \quad (5.10)$$

Задаваемая выражением (5.10) величина  $N$  определяет число реализаций эксперимента, которое необходимо получить при имитационном моделировании, чтобы обеспечить требуемую точность и достоверность.

Вторым вариантом определения  $N$  является последовательный алгоритм, суть которого состоит в текущем контроле точности оценки рассматриваемых параметров и остановки расчета модели при достижении заданной точности. Вначале задается некоторое число расчетов модели  $N_0$ , по результатам которых наряду с оценкой контролируемых показателей вычисляется оценка ее дисперсии. Если в ходе работы алгоритма оказывается, что

$$Z_{1-a/2}^2 \cdot \sigma_u^2 > E^2 \cdot N, \quad (5.11)$$

тогда назначается дополнительное число реализаций расчетов модели  $\Delta N$ , после которых производится уточнение оценки контролируемых параметров. Такая процедура повторяется до получения требуемой точности  $E$ . При этом общее число опытов не должно превышать максимально допустимого значения  $N_{max}$ . Данные алгоритмы использовались для определения необходимого объема испытаний при статистическом имитационном моделировании процесса

функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 с учетом процедур разработанного алгоритма распределенного доступа. При допустимой погрешности  $E=0.01$  Мбит/с и доверительной вероятности  $P_{[a,b]} = 0.99$  необходимое число испытаний  $N_{mp}$  составило примерно:

- $N_{mp}$  {базовый режим, без использования алгоритма}= 18770;
- $N_{mp}$  {базовый режим, с использованием алгоритма}=21020;
- $N_{mp}$  {RTS/CTS, без использования алгоритма}=16980;
- $N_{mp}$  {RTS/CTS, с использованием алгоритма}=17930.

Таким образом, для обеспечения репрезентативности выборки при статистическом имитационном моделировании с доверительной вероятностью 0.99 и допустимой погрешностью 0.01 в среднем потребуется порядка 20 тыс. измерений. Из таблицы 5.2 видно, что в ходе имитационного моделирования объемы анализируемых выборок  $N_{имм.}$  удовлетворяют требуемым значениям  $N_{mp}$ , а следовательно можно полагать, что средние значения пропускной способности для рассматриваемых режимов (см. таблица 5.2) с вероятностью  $P_{[a,b]} = 0.99$  будут находиться в интервалах  $m[x] \pm 0.01$ .

### **Выводы по главе:**

1. В данной главе для проверки работоспособности и оценки эффективности предлагаемых в диссертационной работе решений было проведено имитационное компьютерное моделирование основной целью которого являлось: верификация разработанной математической модели; оценка эффективности применения разработанного алгоритма распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11 и получение количественных показателей производительности моделируемой беспроводной сети.

2. Верификация математической модели была произведена путём сравнения полученных с помощью неё численных результатов (см. п.п. 2.5) с результатами имитационного моделирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11b в симуляторе OpNet (релиз RiverBed Modeler). Сравнительный анализ результатов



аналитического и имитационного моделирования показал, что относительная погрешность полученных результатов для базового механизма доступа составила 8,06%, а для механизма RTS/CTS составила 7,62%, что позволяет сделать вывод о адекватности разработанной математической модели.

3. Для оценки эффективности применения синтезированного алгоритма распределенного доступа была разработана компьютерная программа имитационного моделирования канального уровня стандарта IEEE 802.11. Средством разработки был выбран язык программирования C++. Компьютерное моделирование показало, что:

- в более 90% наблюдаемого интервала времени применение разработанного алгоритма повышает пропускную способность сети как для базового (до 40%), так и RTS/CTS (до 20%) механизмов доступа, в сравнении с режимами не использующими его;

- если алгоритм не используется, то зависимость пропускной способности сети с увеличением интенсивности нагрузки, ведет себя неустойчиво как в базовом режиме, так и в режиме RTS/CTS. При использовании разработанного алгоритма наблюдается стабилизация пропускной способности на уровне значений близких к максимальным.

4. Проведен статистический анализ точности моделирования (валидация данных имитационного моделирования) процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11 с учетом процедур разработанного алгоритма распределенного доступа. В ходе анализа определен доверительный интервал средних значений анализируемых параметров, а также определен объем статистических данных  $N$ , который необходимо получить при имитационном моделировании, чтобы обеспечить требуемую точность и достоверность результатов. При допустимой погрешности  $E=0.01$  и доверительной вероятности  $P_{[a,b]}=0.99$  необходимое число измерений оцениваемых параметров в среднем составило порядка 20 тыс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ существующих распределенных систем управления, определены роль и место технологий беспроводной передачи данных в структуре данных систем. Проанализированы технологии стандарта IEEE 802.11 наиболее широко используемые в распределенных системах с выявлением особенностей функционирования. Проведен анализ способов и методов управления доступом к среде передачи данных в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11. Исследованы существующие аналитические подходы к оценке производительности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 на MAC-уровне в различных условиях их функционирования.

2. Разработана математическая модель процесса функционирования беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, базирующаяся на аппарате цепей Маркова и отличающаяся от известных учётом состояния загруженности станций сети и возможного искажения передаваемых пакетов в результате воздействия помех. Для разработанной модели получены в явном виде аналитические выражения для оценки пропускной способности сети, времени задержки передачи пакета, вероятности передачи и отказа в обслуживании (передачи) пакета.

3. Разработан алгоритм настройки параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий повышение пропускной способности сети за счет поиска оптимальных (по критерию максимума пропускной способности) значений начального "окна конкуренции"  $W_0$  и количество попыток повторных передач пакета  $m$ . С использованием разработанного алгоритма проведена оценка эффективности применения механизма настройки параметров  $W_0$ ,  $m$ . В зависимости от условий функционирования сети выигрыш (по показателю пропускной способности) от применения алгоритма может достигать до 30% для базового механизма доступа и до 12% для RTS/CTS механизма доступа в сравнении с показателями,

полученными для значений параметров канального уровня, рекомендованных стандартом 802.11.

4. Разработана методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала, учитывающая состояние загруженности станций сети и формирующая решающее правило по допуску в канал нового информационного потока. На основе разработанной методики предложен модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на значениях близких к максимальным при высокой нагрузке в сети. Разработанный алгоритм использует и дополняет механизм множественного доступа с функцией распределенной координации (DCF) стандарта IEEE 802.11. Проведено исследование основных свойств разработанного алгоритма и разработаны научно-технические предложения по его практическому использованию в радиооборудовании стандарта IEEE 802.11. Алгоритм рекомендуется использовать как при проектировании новых, так и при модернизации (повышении эффективности функционирования) уже существующих систем беспроводного доступа.

5. Разработана компьютерная имитационная модель MAC-уровня стандарта IEEE 802.11, реализующая разработанный алгоритм распределенного доступа в базовом и RTS/CTS режимах работы.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ	– автоматизированная система управления
ГКРЧ	– государственная комиссия по радиочастотам
ГТП	– газотранспортное предприятие
ГРС	– газораспределительная станция
РС	– распределенная система
СМО	– система массового обслуживания
СПД	– сеть передачи данных
АСК	– Acknowledge, подтверждение
CTS	– Clear To Send, готовность к отправке
CSMA/CD	– Carrier Sence Multiple Access with Collision Detection, множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий
CSMA/CA	– Carrier Sence Multiple Access with Collision Aviodance, множественный доступ с контролем несущей и избеганием коллизий
DCF	– Distributed Coordination Function, распределённая функция координации
DIFS	– DCF Interframe Space, интервал времени выполнения DCF
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum, прямая последовательность перестройки частоты
FHSS	– Frequency Hopping Spread Spectrum, скачкообразная псевдослучайная перестройка частоты
FIFO	– First In, First Out, принцип обработки очереди по принципу "первым пришёл – первым обслужен"
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers, институт инженеров электротехники и электроники
IP	– Internet Protocol, маршрутизируемый протокол сетевого уровня – стека TCP/IP
LLC	– Logical Link Control, управление логической связью
MAC	– Media Access Control, управление доступом к среде передачи данных
MIMO	– Multiple Input Multiple Output, метод пространственного кодирования сигнала, основанный на передаче и приеме данных с помощью нескольких антенн
OFDM	– Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с разделением по ортогональным частотам
PCF	– Point Coordination Function, точечная функция координации
RTS	– Request To Send, запрос на отправку
SIFS	– Short Interframe Space, короткий интервал времени
SOFDMA	– Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access, масштабируемый ортогональный частотный множественный доступ

- QoS – Quality of Service, качество обслуживания
- QPSK – Quadrature Phase Shift Keying, квадратурная фазовая манипуляция
- WLAN – Wireless Local Area Network, беспроводная локальная сеть
- WPAN – Wireless Personal Area Network, беспроводная персональная сеть
- WAN – Wide Area Network, глобальная компьютерная сеть

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Standard 802.11™-2007. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications / IEEE, New York, USA. 12 June 2007. – P. 1233.
2. Зюко, А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи / А.Г. Зюко. – М.: Связь, 1972. – 359 с.
3. Большая Советская Энциклопедия. 3-е изд.– М.:, 1978. – 678 с.
4. Танненбаум, Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Танненбаум, М. Ван Стеен. - СПб.: Питер, 2003. - 877 с.
5. Анисимов, Д. В. Решение задач управления сетевыми ресурсами в условиях динамического изменения конфигурации беспроводной сети АСУП / В.Т. Ерёменко, Д.В. Анисимов, Д.А. Плащенков, Д.А. Краснов, С.А. Черепков, А.Е. Георгиевский // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 6.
6. Анисимов, Д. В. Моделирование пропускной способности сегмента беспроводной сети АСУП на базе стандарта 802.11 / В.Т. Ерёменко, Д.В. Анисимов, С.А. Черепков, А.А. Лякишев, П.А. Чупахин // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 2. – С. 82-86.
7. Кругляк, К. Локальные сети Ethernet в АСУ ТП: быстрее, дальше, надежнее / К. Кругляк // Современные технологии автоматизации. – 2003. – №1.
8. Шинаков, Ю.С. Системы связи с подвижными объектами / Ю.С. Шинаков, М.М. Маковеева. – М.: Радио и связь, 2002. – 450 с.
9. Хазарадзе, Т.О. Построение масштабных АСУ ТП: опыт решения проблемы / Т.О. Хазарадзе, А.И. Куликов // Мир компьютерной автоматизации. – 2002.– №5. – С. 37–45.
10. Решетников, И.С. Автоматизация производственной деятельности газотранспортной компании / И.С. Решетников. – М.: НГСС, 2011. – 116 с.
11. Терханов, А.К. Особенности создания и внедрения вертикально-интегрированного решения с построением автоматизированной системы производственного управления газотранспортным предприятием / А.К. Терханов // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2010. – №10. – С.12–13.
12. Анисимов, Д. В. Математическое моделирование беспроводного сегмента вычислительной сети АСУ ПП / В.Т. Ерёменко, Д.В. Анисимов, Т.М. Парамохина, А.А. Лякишев // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 67-72.
13. Точилин, Н.В. Применение Internet- и Intranet-технологий для обмена электронными данными / Н.В. Точилин // Научно-экономический сборник "Газовая промышленность". – М.: ООО "ИРЦ Газпром". – 2000. – №6.
14. Гайкович, Г.Ф. Беспроводные технологии и их применение в промышленности: анализ распределения полос радиочастот для промышленного сектора в разных регионах мира, включая Россию / Г.Ф. Гайкович // Электронные компоненты. – 2010. – №4. – С. 1–7.

15. Шахнович, И. Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15 / И. Шахнович // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №6. – С.32–36.
16. Федоров, В. Модули Bluetooth в промышленных приложениях и системах сбора информации / В. Федоров // Беспроводные технологии. – 2006. – №2. – С.8–10.
17. Балонин, Н.А. Беспроводные персональные сети на основе ZigBee: учебное пособие / Н.А Балонин., М.Б. Сергеев. – СПб: ГУАП, 2012. – 58 с.
18. Приказ Минкомсвязи России от 14.09.2010 № 124 "Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_147944/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_147944/).
19. Рахманов, С. Особенности развития современных технологий беспроводного доступа Wi-Fi и WiMAX в России и во всем мире / С. Рахманов // Мобильные телекоммуникации. – 2006. – №4.
20. Щербаков, В.Б. Безопасность беспроводных сетей: стандарт IEEE 802.11 / В.Б. Щербаков, С.А. Ермаков. – М.: РадиоСофт, 2010. – 255 с.
21. Рашич, А.В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие / А.В. Рашич. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 179 с.
22. Гармонов, А.В. Технический обзор стандарта IEEE 802.16 / А.В. Гармонов и др. // Мобильные системы. – 2005. – №11. – С. 16–24.
23. Сюваткин, В.С. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин, и др.; под ред. В. В. Крылова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 368 с.
24. Немировский, М.С. Системы цифровой радиосвязи / М.С. Немировский, Л.Н. Волков, Ю.С. Шинаков. - М.: Эко-Трендз, 2005. - 392 с.
25. Немировский, М.С. Цифровая передача информации в радиосвязи / М.С. Немировский. - М.: Связь, 1980. - 256 с.
26. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебное пособие. – 3-е изд. / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб.: Питер, 2009. – 958 с.
27. Пахомов, С. Анатомия беспроводных сетей / С. Пахомов // Компьютер Пресс. – 2002. – №7. – С.167–175.
28. Нетес В.А. Надежность сетей связи: тенденции последнего десятилетия / В.А. Нетес // Электросвязь. – 1998. – № 1. – С. 25–27.
29. Пахомов, С. Механизмы коллективного доступа в сетях 802.11 / С. Пахомов // Компьютер Пресс. – 2004. – №5.
30. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 392 с.

31. Степанов, С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. Теория и практика инфокоммуникаций / С.Н. Степанов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 868с.
32. Засецкий, А.В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Часть II / А.В. Засецкий, С.Д. Постников и др.; под ред. А.Б. Иванова. – М.: Сайрус Систем, 2001. – 336 с.
33. Ширко А.И., Катygин Б.Г. Расчет вероятностей состояний канала сети ШБД при наличии "скрытых" станций/ Б.Г. Катygин, А.И. Ширко //Сборник докладов II Международной научно-технической конференции "Радиотехника, электроника и связь". – Омск: ОАО "Омский научно-исследовательский институт приборостроения". – 2013. – С. 115-122.
34. Захаров, А.С. Метод случайного доступа. Ч. 1 : методические указания / А. С. Захаров ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2012.
35. Крейнделин, В. С. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи / В. С. Крейнделин. СПб.: Линк, 2009. - 276 с.
36. Педжман, Р. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11.: Пер. с англ. / Рошан Педжман, Джонатан Лиэри. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004 – 304 с.
37. Зюльков А. В., Ефанов А. А. Производительность беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 / Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2010. №2. С.229–240.
38. Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
39. Савинков, А.Ю. Реализация координированного доступа к среде передачи в сетях Wi-Fi / А.Ю. Савинков, М.А. Кириченко, А.А. Лавлинский // Теория и техника радиосвязи. № 4, Воронеж, 2011. – С. 87-96.
40. Вишневский, В.М. Метод оценки показателей производительности беспроводных сетей с централизованным управлением / А.С. Баканов, В.М. Вишневский, А.И. Ляхов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – №4.
41. Bianchi G. IEEE 802.11 – Saturation throughput analysis // IEEE Communications Letters, December 1998. – Vol.2, №12. – P. 318-320.
42. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on Selected areas in Comm. – March 2000. – Vol. 18, №3. – P. 535-547.
43. F. Cali, M. Conti, E. Gregori. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit // ACM Transactions on Networking, 8(6), December 2000. - P. 785-799.
44. Chatzimisios P. Packet delay analysis of IEEE802.11 MAC protocol / P. Chatzimisios, a. C. Boucouvalas, V. Vitsas // Electronics Lett. – Sept. 2003. – Vol. 39, No. 18.



45. Chatzimisios P., Boucouvalas A.C., Vitsas V. IEEE 802.11 packet delay a finite retry limit analysis. // Proceedings of IEEE Globecom, San Francisco, U.S.A., December 2003. – P. 950-954.
46. Chatzimisios P. Influence of channel BER on IEEE 802.11 DCF / P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas, V. Vitsas // Electronics Lett. – 13th Nov 2003. – Vol. 39, No. 23.
47. Szczypiorski K. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF networks / K. Szczypiorski, J. Lubacz // Journal of Zhejiang University – Science a, Zhejiang University Press, co-published with Springer-Verlag Gmbh. – October 2008. – Vol. 9, No. 10.
48. Chatzimisios P. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors / P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas, V. Vitsas // in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2004). – June 2004. – Vol. 7. – P. 3854–3858.
49. Chatzimisios P. Revisit of fading channel characteristics in IEEE 802.11 WLANs: independent and burst transmission errors / P. Chatzimisios, V. Vitsas, A. C. Boucouvalas // the 17th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06).
50. Rodolfo Oliveira, Performance analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function with unicast and broadcast traffic / Rodolfo Oliveira, Luis Bernardo, Paulo Pinto // the 17th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06).
51. Raptis P. Delay Distribution analysis of the RTS/CTS mechanism of IEEE 802.11 / P. Raptis, A. Banchs, V. Vitsas, P. Chatzimisios, K. Paparrizos // 31st IEEE Conference on Local Compute Networks (LCN '06) - Tampa, Florida, USA. - 16-18 November 2006. - P. 404-410.
52. Raptis P. Delay Distribution analysis of IEEE 802.11 with Variable Packet Length / P. Raptis, V. Vitsas, a. Banchs, K. Paparrizos // in Proc. of the 65th IEEE Vehicular technology Conference 2007 (VTC 2007-Spring). - April 2007. - P. 830-834.
53. Andrea Zanella Statistical Characterization of the Service time in Saturated IEEE 802.11 Networks / Andrea Zanella and Francesco De Pellegrini // IEEE Commun. Lett. – March 2005. – Vol. 9, No. 3.
54. Hai L. Vu Accurate Delay Distribution for IEEE 802.11 DCF / Hai L. Vu, Taka Sakurai // IEEE Commun. Lett. – April 2006. – Vol. 10, No. 4.
55. Chuan Heng Foh. A Markovian Framework for Performance Evaluation of IEEE 802.11 / Chuan Heng Foh, Moshe Zukerman, Juki Wirawan Tantra // IEEE transactions on wireless communications. – April 2007. – Vol. 6, No. 4. – P. 1276-1285.
56. Kaveh Ghaboosi Modeling IEEE 802.11 DCF Using Parallel Space–time Markov Chain / Kaveh Ghaboosi, Yang Xiao // IEEE trans. On vehicular tech. – July 2008. – Vol. 57, No 4.

57. Ziouva E., Antonakopoulos T. The IEEE 802.11 distributed coordination function in small-scale ad-hoc wireless LANs // International Journal of Wireless Information Networks, Vol.10, No. 1, 2003. - P. 1-15.
58. Ziouva E., Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis // Computer Communications , vol. 25, 2002. – P.313–321.
59. Zhai H. Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs / H. Zhai, Y. Kwon, Y. Fang // Wireless Commun. Mob. Comput. - 2004. - Vol. 4. — P. 917—931.
60. Zheng Y. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in binary symmetric channels / Y. Zheng, K. Lu, D. Wu, and Y. Fang // in Proc. IEEE GLOBECOM – Dec. 2005. – Vol. 5. – P. 3144–3148.
61. Engelstad P. analysis of the total delay of IEEE 802.11e EDCA and 802.11 DCF / P. Engelstad, O. Sterb // in Proc. IEEE ICC - June 2006.
62. Ozdemir M. An M/MMGI/1/K queuing model for IEEE 802.11 ad hoc networks / M. Ozdemir, a. McDonald // in Proc. 1st ACM Intl. Workshop on Perf. Eval. of Wirel. Ad Hoc Sensor Ubiquit. Net. PEWASUN'04. - Apr. 2004. - P. 107-111.
63. Tickoo O. Queueing analysis and delay mitigation in IEEE 802.11 random access MAC based wireless networks / O. Tickoo, B. Sikdar // in Proc. INFOCOM 2004. – Mar. 2004. – Vol. 2. – P.1404–1413.
64. Tickoo O. A queueing model for finite load IEEE 802.11 random access MAC / O. Tickoo, B. Sikdar // in Proc. ICC 2004 – June 2004. – Vol. 1. – P.175–179.
65. Abdrabou A. Service time approximation in IEEE 802.11 Single-Hop Ad Hoc Networks / A.Abdrabou, W. Zhuang // IEEE trans. On Wireless Comm. - Jan. 2008. - Vol. 7, No 1.
66. Коханович, Г.Ф. Сети передачи пакетных данных / Г.Ф. Коханович, В.М. Чуприн. - К.: "МК-Пресс", 2006. - 272 с.
67. Столлингс, В. Беспроводные линии связи и сети.: Пер.с англ. / В. Столлингс. – М.: Изд.дом "Вильямс", 2003. – 640 с.
68. Суторихин, Н.Б. Терминология в области качества обслуживания абонентов на сетях электросвязи / Н. Б. Суторихин // Электросвязь. – 1988. – № 12. – С.5–12.
69. Сычев, К.И. Модели систем массового обслуживания в практических задачах анализа систем мобильной связи / К.И. Сычев, И.Ф. Михалевич. – Орёл: Академия ФАПСи, 2003. – 211 с.
70. Сычев, К.И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи / К.И. Сычев. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2008. – 272 с.
71. Bianchi G, Fratta L, Oliveric M. Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LAN. // Proceedings of IEEE on PIMRC, Taipei, Taiwan, October 1996. – P. 392-396.

72. Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 wireless LAN: capacity analysis and protocol enhancement. // Proceedings of INFOCOM, San Francisco, U.S.A., March 1998. – P. 142-149.
73. Cantieni GR, Ni Q, Barakat C, Turletti T. Performance analysis under finite load and improvements for multirate 802.11. // Computer Communications 28, 2005. – P. 1095-1109.
74. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для бакалавров / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 7-е изд. – М.: Юрайт, 2012. – 343 с.
75. Саати, Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения: Пер с англ. Изд. 3-е. / Т.Л. Саати. – М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2010.
76. Ивченко, Г.И. Теория массового обслуживания / Г.И. Ивченко, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.
77. Шлома, А.М. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / А.М. Шлома, М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.П. Шумов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 344 с.
78. Kleinrock L. Queueing Systems, Volume II: Computer Applications. New York: Wiley, 1976. – P. 576.
79. Takagi H., Kleinrock L. Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems // IEEE Transactions in Communications. V.7. 1985. – P. 627-638.
80. Путилин, А.Н. Моделирование процесса обслуживания заявок в системах множественного доступа / А.Н. Путилин, Е.Г. Белобров, И.Б. Парашук // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1998. – №3. – С. 63–70.
81. Крылов, В.В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
82. Шелухин, О. И. Моделирование информационных систем / О. И. Шелухин, А. М. Тенякшев, А. В. Осин. – М.: Радиотехника, 2005. – 368с.
83. Хинчин, А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания / А. Я. Хинчин. – М.: Физматгиз, 1963. – 235 с.
84. Карманов, А.В. Исследование управляемых конечных марковских цепей с неполной информацией (минимаксный подход) / А.В. Карманов – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2002. – 176 с.
85. Майн, Х. Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С.Осаки. – М.: Наука, 1977. – 177 с.
86. Марковская теория оценивания в радиотехнике / Под ред. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 504 с.
87. Портенко, Н.И. Марковские процессы / Н.И. Портенко, А.В. Скороход, В.М. Шуренков. – М.: ВИНТИ, 1989. – 248 с.
88. Стратонович, Р.Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления / Р.Л. Стратонович. – М.: МГУ, 1965. – 318 с.
89. Тихонов, В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.

90. Дынкин, Е.Б. Марковские процессы / Е.Б. Дынкин. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1963. – 860 с.
91. Дынкин, Е.Б. Управляемые марковские процессы и их приложения / Е.Б. Дынкин, А.А. Юшкевич. – М: Наука, 1975. – 338 с.
92. Chien-Erh Weng, Hsing-Chung Chen. The performance evaluation of IEEE 802.11 DCF using Markov chain model for wireless LANs // Computer Standards & Interfaces, Volume 44, February 2016. – P. 144-149.
93. Chatzimisios P., Vitsas V., Boucouvalas A. C., Tsoulfa M. Achieving performance enhancement in IEEE 802.11 WLANs by using the DIDD backoff mechanism // INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS, 2007, №20. – P. 23–41.
94. Mohand Yazid, Djamil Aïssani, Louiza Bouallouche-Medjkoune, Nassim Amrouche, Kamel Bakli. Modeling and enhancement of the IEEE 802.11 RTS/CTS scheme in an error-prone channel // Formal Aspects of Computing, January 2015, Volume 27, Issue 1. – P. 33-52.
95. Katarzyna Kosek-Szott. A comprehensive analysis of IEEE 802.11 DCF heterogeneous traffic sources // Ad Hoc Networks, Volume 16, May 2014. – P. 165-181.
96. Chatzimisios P., Vitsas V., Boucouvalas A. Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol // Networked Appliances, IEEE 5th International Workshop. – 2002.
97. Robinson J.W., Randhawa T.S. Saturation throughput analysis of IEEE 802.11e enhanced distributed coordination function. // IEEE JSAC, 22(5). – 2004 – P. 917-928.
98. Hadzi-Velkov Z, Spasenovski B. Saturation throughput-delay analysis of IEEE 802.11 DCF in fading channel. // Proceedings of ICC, Alaska, U.S.A., May 2003. – P. 121-126.
99. Malone D., Duffy K., Leith D.J. Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated heterogeneous conditions // IEEE-ACM Trans. On Networking, vol. 15, No.1, 2007. – P. 159-172.
100. Changsen Zhang , Pengpeng Chen, Jianji Ren, Xiaofei Wang, Athanasios V. Vasilakos. A backoff algorithm based on self-adaptive contention window update factor for IEEE 802.11 DCF // Wireless Networks, 12 January 2016. – P. 1-10.
101. Анисимов, Д.В. Оценка производительности канального уровня стандарта IEEE 802.11 с учетом состояния загруженности элементов сети и влияния помех в распределенных автоматизированных системах управления / Д.В. Анисимов, С.В. Дмитриев, А.А. Двилянский // Приборы и системы для автоматизации промышленных предприятий – 2016. – №7. – С. 10-18.
102. Анисимов, Д. В. Моделирование состояний пропускной способности беспроводного канала сети передачи данных газотранспортного предприятия на основе насыщенных цепей Маркова / Д.В. Анисимов // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 5. – С. 5-14.

103. Парк, Дж., Передача данных в системах контроля и управления. Практическое руководство / Дж.Парк, С.Маккей, Э. Райт. – М.: ООО "Группа ИТД", 2007. – 480 с.
104. Анисимов, Д.В. Алгоритм оптимизации параметров канального уровня беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, обеспечивающий максимизацию пропускной способности / Д.В. Анисимов, С.В. Дмитриев, В.В. Рябоконт // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т. 64. №2.– С. 67-72.
105. Самуйлов, К.Е. Задачи оптимального планирования межуровневого интерфейса в беспроводных сетях / К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, Т.В. Ефимушкина, А.К. Самуйлов // Информатика и ее применения. – 2012. – Т. 6, № 3. – С. 74–80.
106. Поповский, В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах / В.В. Поповский, В.Ф. Олейник. – Х.: СМИТ, 2011. – 368 с.
107. Мельников, Д.А. Информационные процессы в компьютерных сетях: протоколы, стандарты, интерфейсы, модели / Д.А. Мельников. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 1999. – 256 с.
108. Маковеева, М.М. Системы связи с подвижными объектами / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
109. Ефанов, А.А. Производительность беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 / А.В. Зюльков, А.А. Ефанов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2010. – № 2. – С. 229–240.
110. Weinmiller J, Woesner H, Ebert JP, Wolisz A. Analysis and tuning the distributed coordination function in the IEEE 802.11 DCF MAC draft standard. // Proceedings of MASCOT, San Jose, California, February, 1996. – P. 200-206.
111. Pong D, Moors T. Call admission control for IEEE 802.11 contention access mechanism // Proceedings of IEEE Globecom, San Francisco, U.S.A., December 2003. – P. 174-178.
112. Valaee S, Li B. Distributed call admission control for ad hoc networks. // Proceedings of VTC, Vancouver, BC, Canada, September 2002. – P. 1244-1248.
113. Satyajit Sarmah, S.K. Sarma. Performane Analysis of IEEE 802.11 WLAN by Varying PCF, DCF and EDCF to Enhance Quality of Service // International Journal of Computer Applications, Volume 138, №3, March 2016. – P. 22-25.
114. Нетес, В.А. Качество обслуживания на сетях связи: Обзор рекомендаций МСЭ-Т / В.А. Нетес // Сети и системы связи. – 1999. – № 3. – С. 14–21.
115. Zhang L, Zeadally S. HARMONICA: enhanced QoS support with admission control for IEEE 802.11 contention-based access. // Proceedings of RTAS, Toronto, Canada, May 2004. – P. 64-71.
116. Анисимов, Д. В. Подход к оценке качества предоставления информационных услуг в беспроводной сети передачи данных АСУТП газотранспортного предприятия в условиях воздействия помех и вне протокольных прерываний /

- В.Т. Ерёмченко, Д.В. Анисимов, Д.А. Краснов, С. А. Воробьёв // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 4. – С. 96-105.
117. Анисимов, Д. В. Моделирование процесса сбора и обработки данных в беспроводном сегменте АСУ ТП газотранспортного предприятия / Д.В. Анисимов // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 3. – С. 5-10.
118. Ицкович, Э.Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях / Э.Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №6. – С. 39–44.
119. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
120. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загал. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 564 с.
121. Поповский, В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах / В.В. Поповский, В.Ф. Олейник. – Х.: СМІТ, 2011. – 368 с.
122. Hadamard J. Le probleme de Cauchy et les equations aux derivees partielles unepaires hyperboliques. – Paris: Herman, 1932.
123. Аляев, Ю.А. Дискретная математика и математическая логика / Ю.А. Аляев, С.Ф. Тюрин. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 368 с.
124. Игошин В.И. Математическая логика и теория алгоритмов : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. И. Игошин. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр "Академия", 2008. – 448 с.
125. Мальцев А.Н. Алгоритмы и рекурсивные функции. – М., Наука, 1986. – 366 с.
126. Абрамов С.А. Лекции о сложности алгоритмов / С.А. Абрамов. – М.: МЦНМО, 2009. – 256 с.
127. Кормен, Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон, Р.Л. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с.
128. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2003. – 632 с.
129. Ахо, А.В. Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2000. – 384 с.
130. Имитационное моделирование производственных систем / Под ред. А.А. Вавилова. – М.: Прогресс. 1983. – 321 с.
131. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS: 3-е изд./ В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер, 2004. – 847 с.
132. Савинков, А. Ю. Моделирование сетей связи с распределенным управлением доступом к радиоканалу / Радиотехника, №5, Москва, 2016. – С. 97-104.
133. Боев, В. Д. Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики. Учеб. пособие / В. Д. Боев , Р. П. Сыпченко. – СПб.: Военная академия связи, 2009. – 432 с.

134. The Network Simulator – ns-2. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://isi.edu/nsnam/ns/>.
135. OMNeT++. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://omnetpp.org/>.
136. NS-3. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nsnam.org/>.
137. Riverbed Modeler. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/ru-network-simulation.html>.
138. Ивченко, Г.И. Математическая статистика / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. - М.: Высшая школа, 1992. - 304 с.
139. Бочаров, П.П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. - М.: Гардарики, 1998. - 328 с.
140. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. – 4-е изд. – М.: Наука, 1969. – 580 с.
141. Shafiq, M.Z. A First Look at Cellular Machine-to-Machine Traffic: Large Scale Measurement and Characterization / M.Z. Shafiq and all. // 12th ACM Sigmetrics. Performance International Conference. June 11-15, London, England, UK, 2012. – P. 65–76.
142. Koucheryavy, A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Telemetry Applications. / A. Koucheryavy, A. Prokopiev // Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking. 11th International Conference, NEW2AN 2011, and 4th Conference on SmartSpaces, ruSMART 2011. St.Petersburg, Russia, August 2011, Proceedings. LNCS 6869. Springer, 2011. – P.287.
143. Potsch, T. Influence of Future M2M Communication on the LTE System / T.Potsch, S.N.K.Marwat, Y.Zaki, C.Gorg // Wireless and Mobile Networking Conference. Dubai, United Arab Emirates, 23-25 April 2013. – 4 p.
144. Парамонов, А.И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13 / А.И. Парамонов. – Санкт-Петербург, 2014. – 325 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Краткая характеристика стандартов беспроводных СПД, используемых в распределенных системах управления

**IEEE 802.15.1 (Bluetooth).** Основная область применения технологии Bluetooth – интеграция компонентов систем автоматизации в локальные сети на базе полевой шины или в сети промышленного Ethernet. Благодаря поддержке различных пользовательских профилей стандарт беспроводной связи может применяться для решения широкого круга задач [15, 16].

**IEEE 802.15.4 (ZigBee)** – спецификация сетевых протоколов верхнего уровня (уровня приложений API и сетевого уровня NWK), использующих сервисы нижних уровней – уровня управления доступом к среде MAC и физического уровня PHY, регламентированных стандартом IEEE 802.15.4. Спецификация ZigBee ориентирована на приложения, требующие гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания (батарей) [17]. Применение сетей ZigBee в Российской Федерации в частотном диапазоне 2,405-2,485 ГГц не требует получения частотных разрешений и дополнительных согласований [18].

**IEEE 802.11 (Wi-Fi)** – набор протоколов связи для коммуникации в беспроводной локальной сетевой зоне частотных диапазонов 0,9; 2,4; 3,6 и 5 ГГц. Данные технологии широко применяются в различных распределенных системах. Использование Wi-Fi устройств на предприятиях обусловлено высокой помехоустойчивостью, что делает их успешно применимыми на предприятиях с множеством металлических конструкций. В свою очередь, использующие этот стандарт приборы не создают существенных помех для узкополосных радиосигналов [19, 20]. Существуют следующие, широко распространённые разновидности данного стандарта:



**IEEE 802.11** – первый протокол, который регламентирует соединение на частоте 2.4 ГГц со скоростью 1-2 Мбит/с. Этот протокол был принят в 1997 году и реализован в некоторых продуктах, однако вскоре был полностью вытеснен более совершенным IEEE 802.11 b.

*IEEE 802.11b* – был принят в 1999 году и стал первым протоколом беспроводной связи, который позволял обеспечивать эффективный доступ в сеть Интернет. Скорость соединения по нему на частоте 2.4 ГГц доходила до 11 Мбит/с, а дальность связи внутри помещения – до 50 метров.

*IEEE 802.11a* – был принят в 1999 году, но стал использоваться в беспроводных устройствах только с 2001 года. Протокол 802.11a впервые описывал технологию беспроводной передачи данных на скорости до 54 Мбит/с. Вместо частотного диапазона 2.4 ГГц в нём использовался частотный диапазон 5 ГГц для исключения взаимных помех от многочисленного оборудования, работающего в диапазоне 2.4 ГГц. Первоначально, протокол 802.11a имел невысокую популярность из-за небольшой площади покрытия и ограничений (во многих странах) на использование диапазона 5 ГГц, однако по мере развития индустрии беспроводной связи и, имея явное преимущество над протоколом 802.11 b, он стал применяться во многих беспроводных устройствах, как резервный.

*IEEE 802.11g* – был окончательно принят в 2003 году, хотя задолго до этого вариации этого протокола широко использовались различными компаниями в своих продуктах. Скорость соединения по этому стандарту на частоте 2.4 ГГц доходит до 54 Мбит/с, а дальность связи внутри помещения – до 50 метров. На сегодня 802.11g – самый популярный протокол беспроводной передачи данных, хотя многие фирмы продолжают работы над его модернизацией, предлагая продукты с новыми технологиями на его базе: MIMO, XR и Super G.

*IEEE 802.11n* – был утверждён 11 сентября 2009. Протокол 802.11n способен обеспечить скорость передачи данных до 480 Мбит/с. Устройства 802.11n работают в диапазонах 2,4 – 2,5 или 5,0 ГГц.

**IEEE 802.16 (Wi-Max)** – телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра услуг и устройств (от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов). Разработчики стандарта искали оптимальные решения как для фиксированного, так и для мобильного применения, но совместить все требования в рамках одного стандарта не удалось. Нацеленность технологий на разные рыночные ниши привела к созданию двух отдельных версий стандарта. Каждая из спецификаций WiMAX определяет свои рабочие диапазоны частот, ширину полосы пропускания, мощность излучения, методы передачи и доступа, способы кодирования и модуляции сигнала, принципы повторного использования радиочастот и прочие показатели. Потому WiMAX-системы, основанные на версиях стандарта IEEE 802.16 e и d, практически несовместимы [21, 22, 23].

На рисунке А.1 приведено сравнение рассматриваемых беспроводных стандартов в зависимости от радиуса действия и скорости передачи в образуемой ими сети.

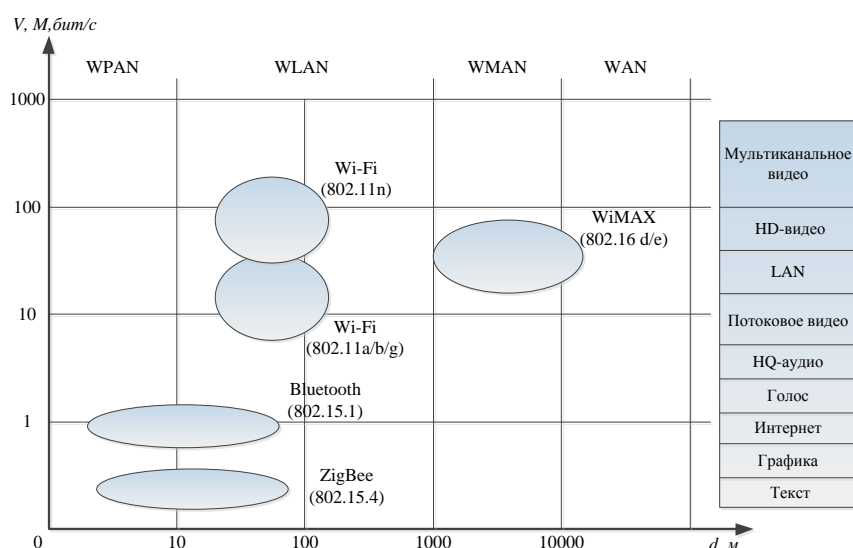


Рисунок А.1 – Сравнение беспроводных технологий, применимых в распределенных СПД

Из всех рассмотренных беспроводных технологий передачи данных наиболее широко используемым в настоящее время (и являющийся

перспективным для дальнейшего развития беспроводных СПД при их модернизации) является стандарт IEEE 802.11. Это связано с тем, что данная технология обладает следующими положительными особенностями:

1. Производительность. IEEE 802.11 использует оптимальную схему модуляции, что обеспечивает высокую производительность системы на расстояниях до 100 метров с высоким уровнем спектральной эффективности, а так же устойчивость к отражению сигнала. Динамическая адаптивная модуляция заложена в механизме работы протокола, что позволяет точкам доступа подбирать оптимальный режим работы с конечными элементами беспроводной сети;

2. Масштабируемость. Стандарт IEEE 802.11 поддерживает технологии увеличения зоны охвата с использованием адаптивных и направленных антенн, а так же разнообразных видов топологии сети;

3. Отсутствие необходимости получения разрешения ГКРЧ на использование рабочих частот. Это относится к пользовательскому оборудованию беспроводного доступа в полосе радиочастот 2400-2483,5 МГц и 5150-5350 МГц с мощностью излучения передающих устройств до 100 мВт включительно, что полностью перекрывает рабочие диапазоны частот протоколов 802.11 a/b/g [18];

4. Приемлемый уровень безопасности. Он обеспечивается путем использования средств и методов аутентификации, средств криптографической защиты передаваемых данных, а так же возможностью использования дополнительных средств защиты.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акты внедрения результатов диссертационного исследования

Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-технический центр Космос-Нефть-Газ»

(ООО «НТЦ Космос-Нефть-Газ»)



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «НТЦ Космос-Нефть-Газ»

А. П. Шевцов



" марта 2013 г.

#### А К Т

внедрения результатов диссертационных исследований  
соискателя ученой степени кандидата технических наук  
Анисимова Дмитрия Владимировича

Настоящим актом подтверждается, что в ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" внедрены следующие результаты диссертационной работы Анисимова Д.В.

1. Разработанная автором методика обеспечения отказоустойчивости сегмента АСУП газотранспортного предприятия использована в проектной деятельности ООО "НТЦ Космос-Нефть-Газ" (г. Воронеж).

2. Применение данной методики позволило в 1,3 раза повысить надежность информационного обмена.

Начальник отдела АСУ ТП

Гоптарев В. И.



А.Г.Митянин

10 октября 2016 г.

## АКТ

**об использовании научных результатов диссертационной работы  
Анисимова Д.В. "Модель и алгоритмы управления параметрами  
канального уровня беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11,  
функционирующих в составе распределенных систем", представленной  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.12.13, в ООО «СТЦ»**

Комиссия в составе: председателя – начальника научно-исследовательского отдела кандидата технических наук доцента Ю.Л. Хохленко и членов комиссии – научного сотрудника кандидата технических наук доцента Н.Н. Воронина, научного сотрудника кандидата технических наук Ю.А. Виноградова составила настоящий акт о том, что в выполняемой ООО «СТЦ» составной части опытно-конструкторской работы «Астра-В» использованы следующие результаты диссертационной работы Анисимова Дмитрия Владимировича:

1. Методика оценки остаточной пропускной способности беспроводного канала стандарта IEEE 802.11, позволяющая рассчитать его пропускную способность в насыщенном и ненасыщенном состояниях и обеспечивающая формирование решающего правила (критерия) по допуску в канал нового информационного потока (с целью исключения перегрузки канала).

2. Модифицированный алгоритм распределенного доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11, учитывающий состояние загруженности станций сети и обеспечивающий стабилизацию пропускной способности сети на максимальных значениях в режиме высокой нагрузки.


Результаты работы представляют практический интерес и были применены при разработке модуля активного мониторинга точек радиодоступа и абонентских терминалов сетей стандарта IEEE 802.11.

Председатель комиссии:

 Ю.Л.Хохленко

Члены комиссии:

 Н.Н.Воронин

 Ю.А.Виноградов