

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»

*На правах рукописи*

**Орлова Маргарита Андреевна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ  
БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
СЕТЕЙ, ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ТРАФИК РЕАЛЬНОГО  
ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы  
и компьютерные сети

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Москва – 2021**

Работа выполнена на кафедре Вычислительных машин систем и сетей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Научный  
руководитель:**

Абросимов Леонид Иванович  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Вычислительные  
машины, системы и сети ФГБОУ ВО «НИУ  
«МЭИ»

**Официальные  
оппоненты:**

**Ведущая  
организация:**

Защита диссертации состоится « 15 » июня 2022 г. в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д XXXXXX при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус В, ауд. В-308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ ноябрь 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МЭИ.022

XXXX

(подпись)

XXXXXX

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Корпоративные беспроводные локальные вычислительные сети (БЛВС) используют ресурсы беспроводного канала связи (БКС) стандарта IEEE 802.11 для передачи трафика сетевых приложений пользователей. В различных корпоративных вычислительных сетях БКС используют для подключения пользователей к внутренним информационно-вычислительным ресурсам корпоративной сети и/или Интернет. Выбор сетей стандарта IEEE 802.11 на предприятиях для создания беспроводного доступа обусловлен простотой развёртывания таких сетей, а также возможностью администрирования данных сетей предприятиями самостоятельно.

В настоящее время различные организации и отдельные пользователи активно используют передачу мультимедийной информации реального времени (видеоконференции, системы удалённого присутствия, управление удалённым рабочим столом, видеоконтроль и т.п.). К таким системам предъявляются строгие требования к гарантированному времени доставки пакетов трафика, интенсивности доставки пакетов и допустимым потерям. Поэтому мультимедийный трафик реального времени (ТРВ) требует средств, обеспечивающих гарантированное время доставки пакетов ТРВ, которое является отличительным признаком систем реального времени (РВ).

Канальные протоколы для беспроводного канала связи (БКС) осуществляют: доступ (конкурентный или с разделением времени) пакета к единой среде передачи данных БКС, доставку пакета данных и подтверждение обмена данными. После осуществления доступа к БКС, беспроводная станция в соответствии с сетевым протоколом осуществляет передачу пакета ТРВ. По мере роста интенсивности ТРВ возникает очередь к БКС, из-за ожидания в которой, возрастает время доставки пакета ТРВ получателю. Ограничение очереди ведёт к потерям, если все места в очереди заняты.

Необходимость обеспечения гарантированной доставки пакетов обусловила появление у IT-специалистов термина QoS (от англ. *Quality of Service* – качество обслуживания). В области

компьютерных сетей термином QoS называют способность сети обеспечить необходимый сервис заданному трафику в определённых технологических рамках. В узком техническом значении, этот термин означает набор методов для управления ресурсами пакетных сетей. Практический интерес представляет качество интегрированного обслуживания, которое согласно RFC 1633 оценивает сквозное (End-to-End) качество обслуживания большого количества терминальных станций, подключённых к БКС, гарантируя необходимую пропускную способность.

Проблемы определения численных значений параметров качества интегрированного обслуживания ТРВ возникают при учёте функциональных особенностей БЛВС. БКС для передачи пакетов ТРВ от нескольких пользователей использует единую среду передачи данных, которая зависит от: ширины полосы пропускания канала связи; количества одновременно функционирующих пользователей БЛВС, которое может изменяться в широких диапазонах; интенсивности пакетов ТРВ, поступающего в течение суток от каждого функционирующего пользователя, которая может изменяться в широких диапазонах, образуя существенные кратковременные перегрузки; канальных протоколов БКС, реализующих временное разделение обслуживания пакетов, которые поступают от пользователей на вход БКС, а также определяющих пакеты, недоставленные получателю (необслуженные) из-за ограничения очереди, и потерянные в результате коллизий.

Научный интерес к стандарту IEEE 802.11 сохраняется и в настоящее время, что подтверждается большим количеством научных работ, посвящённых аналитическому моделированию беспроводных сетей и оценке их производительности в различных условиях, выполненных как отечественными (Вишнеvский, Ляхов, Семенова и др.), так и зарубежными авторами (Bianchi, Cali, Malone, Ziouva, Wu, Hadzi-Velkov и др.). При оценке качества обслуживания ТРВ трафика, возможность потери пакетов, а также особенности функционирования корпоративной БЛВС, до сих пор учтены недостаточно полно, что свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования и определяет актуальность данной работы.

**Объектом исследования** являются корпоративные БЛВС, обеспечивающие доступ к сети Интернет и ресурсам корпоративной локальной вычислительной сети для различных беспроводных устройств с сетевыми приложениями ТРВ.

**Предметом исследования** являются методы исследования и оценки характеристик функционирования корпоративной БЛВС, необходимые для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ.

**Целью работы** является повышение качества обслуживания ТРВ в корпоративных БЛВС за счёт оценки характеристик функционирования корпоративной БЛВС и выработки рекомендаций для конфигурации корпоративной БЛВС.

**Задачи** диссертационной работы для реализации поставленной цели:

- Проанализировать модели и методы оценки характеристик функционирования корпоративных БЛВС, обслуживающих ТРВ.
- Разработать математическую модель корпоративной БЛВС, обслуживающей ТРВ.
- Разработать программный исследовательский стенд для получения характеристик функционирования БЛВС, используемых в разработанной математической модели.
- Разработать программно-аппаратный исследовательский стенд для апробации математической модели БЛВС и программного исследовательского стенда.
- Разработать методику исследования корпоративной БЛВС с помощью программного исследовательского стенда.
- Разработать методику оценки характеристик функционирования корпоративной БЛВС на основании суточных значений параметров БЛВС.
- Разработать методику расчёта конфигурации корпоративной БЛВС для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ.
- Разработать единый метод исследования характеристик функционирования корпоративной БЛВС для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ.

**Методы исследования.**

При проведении исследования в работе использовались методы теории вероятностей и математической статистики, системного анализа, имитационного моделирования и теории массового обслуживания.

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

- предложена математическая модель корпоративной БЛВС с очередью, позволяющая установить время доставки пакета ТРВ, гарантированную интенсивность доставки ТРВ и вероятность потери пакета ТРВ;
- получены характеристики функционирования БЛВС и установлены зависимости времени обработки пакета ТРВ в БКС, необходимые для аналитического расчёта интенсивности и времени доставки трафика ТРВ;
- разработана методика оценки характеристик функционирования корпоративной БЛВС на основании суточных значений параметров БЛВС;
- разработан единый метод исследования характеристик функционирования корпоративной БЛВС для их оценки и выработки рекомендаций для повышения качества обслуживания ТРВ.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке математической модели, позволяющей оценить время доставки пакета ТРВ, интенсивность доставки пакетов ТРВ и количество недоставленных пакетов ТРВ.

**Практическая значимость работы** включает:

- полученные математические соотношения для оценки времени доставки пакета ТРВ, интенсивности доставки пакетов ТРВ, количества недоставленных пакетов ТРВ;
- разработанный программно-аппаратный стенд БЛВС для исследования характеристик функционирования БЛВС, апробации математической модели и программного исследовательского стенда;
- разработанный программный исследовательский стенд моделирования корпоративной БЛВС;

- полученные для широкого диапазона значений интенсивности ТРВ и количества беспроводных станций характеристики функционирования корпоративной БЛВС;
- метод исследования БЛВС, обслуживающей ТРВ, включающий методики моделирования БЛВС, оценки характеристик функционирования эксплуатируемых и проектируемых БЛВС.

**Достоверность полученных результатов** обоснована корректными аналитическими соотношениями, полученными с помощью методов теории вероятности и математической статистики, теории систем массового обслуживания. Полученные результаты подтверждаются апробацией работы и практическим применением.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель корпоративной БЛВС, обслуживающей ТРВ, с очередью и потерями для получения расчётных соотношений оценки качества обслуживания ТРВ (время доставки пакета ТРВ, интенсивность доставки пакетов ТРВ, количество потерянных пакетов ТРВ);
- архитектура исследовательского стенда, позволяющего осуществлять функции имитационного моделирования для получения характеристик функционирования корпоративной БЛВС;
- метод исследования БЛВС, обслуживающей ТРВ, включающий методики моделирования БЛВС, оценки характеристик функционирования эксплуатируемых и проектируемых БЛВС.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, определена научная новизна и практическая значимость данной работы. Сформулирована цель работы и поставлен ряд задач исследования, представлено краткое содержание диссертации по главам.

**В первой главе** перечислены проблемы современных корпоративных БЛВС. С учётом последних технических решений, наиболее остро стоит проблема обеспечения качественной передачи ТРВ. Проанализированы особенности канальных протоколов в корпоративных БЛВС при обслуживании ТРВ. Использование канальных протоколов приводит к увеличению фактического времени передачи пакета ТРВ через БКС. Ограничение буфера беспроводных сетевых карт и особенности канальных протоколов в корпоративных БЛВС приводят к неизбежным потерям пакетов ТРВ. Характеристики функционирования зависят от параметров канального протокола, входной интенсивности ТРВ, количества беспроводных станций. Проведён анализ моделей и методов оценки характеристик функционирования корпоративных БЛВС. Проведённый анализ работ в области оценки характеристик функционирования беспроводных локальных вычислительных сетей показал, что известные аналитические модели не учитывают наличие ограниченного буфера на беспроводных станциях, отсутствуют расчётные соотношения для определения времени гарантированной доставки пакета трафика с учётом регулируемых параметров канального протокола и интенсивности входного трафика. Поэтому для оценки времени доставки обслуженного пакета ТРВ требуется разработать математическую модель (ММ) БЛВС с базовым канальным протоколом (DCF - от англ. *Distributed Coordination Function*).

**Во второй главе** для разработки математической модели проведены исследования функциональных возможностей известных моделей классов М/М/1, М/М/1/С, М/Г/1/С. Задача исследования сформулирована следующим образом. К беспроводному каналу связи (БКС) стандарта IEEE 802.11 подключены  $K$  беспроводных станций (рис. 1.). Интенсивность поступления пакетов ТРВ от  $k$ -ой пользовательской беспроводной станций  $\lambda_k$  ( $k = \{1, K-1\}$ ), интенсивность поступления пакетов ТРВ от беспроводной станции AP  $\lambda_k$  ( $k = K$ ). На канальном уровне пакет ТРВ попадает в буфер размером  $Q$  [пакет]. Пакеты мультимедиа трафика имеют размер  $l$  байт, передаются от пользовательских беспроводных станций к Серверам ЛВС и Internet через коммутационную среду ЛВС.



Задержка передачи через коммутационную среду ЛВС пренебрежимо мала. Требуется получить зависимость времени доставки обслуженного пакета ТРВ, интенсивность успешной доставки пакетов ТРВ и вероятность потерь пакетов ТРВ от количества беспроводных станций, интенсивности входящего ТРВ и пропускной способности беспроводного канала связи (БКС).

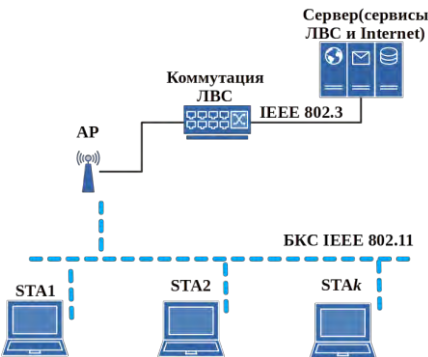


Рис. 1. Схема корпоративной БЛВС

Для решения поставленной задачи выделены основные параметры БЛВС.

В качестве базовой модели корпоративной БЛВС рассмотрена модель СМО класса М/М/1/С с одним обслуживающим прибором и с ограниченной очередью, размером  $S$  мест для сохранения пакетов ( $S = Q \cdot K$ ). СМО, имеющая буфер (накопитель), в

котором  $S$  пакетов могут ожидать обслуживания, описывается системой Колмогорова, которая содержит  $B_i$  уравнений ( $i = \{0, \overline{q}\}$ ). Так как в состояниях  $B_0$  и  $B_1$  очередь равна нулю, то для СМО, содержащей  $S$  ( $S > 0$ ) пакетов в очереди  $q = S + 1$ .

В процессе функционирования модель может находиться в  $S+2$  состояниях, где  $i = \{0, \overline{(S+1)}\}$ :

- Состояние  $i = 0$  - БКС свободен, в очереди 0 пакетов;
- Состояние  $i = 1$  - БКС занят обслуживанием пакета, в очереди 0 пакетов;
- Состояние  $i = 2$  - БКС занят обслуживанием пакета, в очереди 1 пакет ( $S = 1$ );
- Состояние  $i$  - БКС занят обслуживанием пакета, в очереди  $i - 1$  пакет ( $S = i - 1$ ).

Состояние  $i = (S + 1)$  - БКС занят обслуживанием пакета, в очереди  $S$  пакетов, при котором вновь поступивший пакет не обслуживается (теряется) и удаляется.

Для оценки общей нагрузки в БЛВС требуется ввести нормированный безразмерный коэффициент  $\alpha$  интенсивности

входного трафика, равный отношению суммарной интенсивность  $\Lambda$  поступления пакетов трафика на вход БКС и интенсивность  $\mu_1$ :

$$\alpha = \Lambda / \mu_1 \quad (1)$$

В состоянии  $i = q = 1 + S$  очередь переполнена и вновь поступивший пакет ТРВ не будет обслужен и не будет помещён в очередь (пакет будет «потерян»). На рис. 2. показано сравнение вероятности потери пакета для двух аналитических моделей  $M/M/1/\infty$  и  $M/M/1/S$ . При использовании модели  $M/M/1/\infty$  при увеличении входного потока  $\alpha > 1$  передача блокируется, а при использовании модели  $M/M/1/S$  передача пакетов трафика продолжается. Размер очереди  $S$  влияет на потери. При  $S = 1$  потери происходят при малых значениях интенсивности входного потока, при увеличении размера  $S$  очереди потери сокращаются. В случае длинных очередей  $S = 100$  потери начинаются, когда входной поток превышает интенсивность обслуживания ( $\alpha > 1$ ). На рис. 3 показаны зависимости вероятности  $P_o$  потерь от размера  $S$  очереди для разных значений коэффициент  $\alpha$  интенсивности входного трафика. При этом зависимость времени  $T_{достав}$  ( $\alpha, S$ ) показывает, что время доставки пакета ТРВ увеличивается при увеличении  $S$  (рис. 4) и коэффициента  $\alpha$  интенсивности входного трафика. Увеличение времени доставки может приводить к ошибкам в работе сетевых приложений, если время необходимое для гарантированной

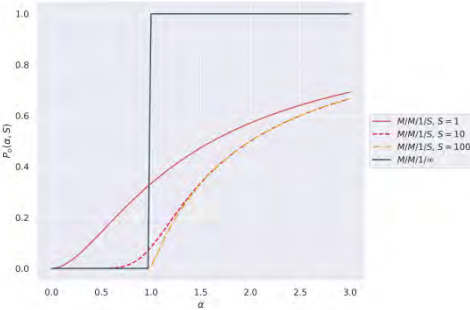


Рис. 2 Сравнение вероятности потери пакета ТРВ при использовании модели  $M/M/1/\infty$  и модели  $M/M/1/S$  ( $S = \{1, 10, 100\}$ )

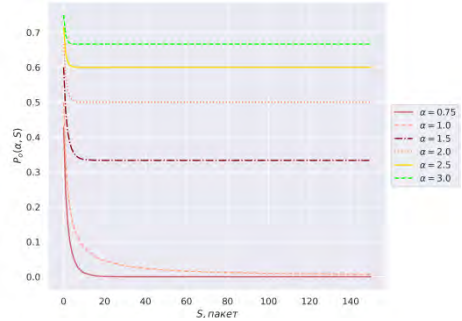


Рис. 3. Зависимости вероятности  $P_o$  ( $\alpha, S$ ) от размера очереди  $S$  для различных значений коэффициента  $\alpha$  интенсивности входного трафика доставки меньше времени

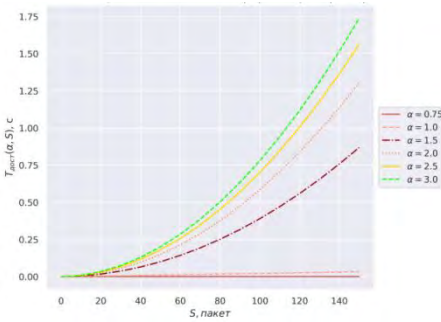


Рис. 4. Зависимости времени  $T_{\text{достав}}$  ( $\alpha, S$ ) доставки пакетов трафика от размера очереди  $S$

время обслуживания пакета и потери, вносимые особенностями канального протокола. Поэтому разработана ММ процесса функционирования БКС с базовым канальным протоколом (DCF), базирующаяся на аппарате цепей Маркова для оценки времени обработки пакета ТРВ в БКС и потерь. ММ должна учитывать: регулируемые и паспортные параметры канального протокола DCF, интенсивность входящего трафика, количество беспроводных станций. Модель поведения  $k$ -ой беспроводной станции при передаче трафика с использованием канального протокола DCF представлена в виде цепи Маркова с дискретным целочисленным временем (рис. 5.). Пусть  $b(t)$  — случайный процесс, описывающий значение счётчика отсрочки (*backoff*) для рассматриваемой станции, значение счётчика отсрочки равновероятно выбирается из интервала  $(0, W_i - 1)$ , где  $W_i$  — значение окна конкуренции для  $i$ -ой попытки передачи пакета  $0 \leq i \leq N_R$ , где:

$$W_i = 2^i \cdot W_0, \text{ при } 0 \leq i \leq m \quad (2)$$

$$W_i = W_{\text{max}}, \text{ при } m < i \leq N_R$$

где:  $s(t)$  — случайный процесс, описывающий номер попытки передачи текущего пакета,  $N_R$  — максимальное число попыток передачи. В каждый момент времени беспроводная станция может находиться в состоянии  $\{i, j\}$ , где  $i$  — номер попытки передачи пакета трафика  $-1 \leq i \leq N_R$ ,  $j$  — значение счётчика отсрочки  $0 \leq j \leq W_i$ .

доставки пакета ТРВ. Модели класса СМО М/М/1/∞ не позволяют оценить характеристики, которые необходимы для обеспечения качества доставки ТРВ, поэтому требуется разработка новой математической модели корпоративной БЛВС, обслуживающей ТРВ.

Базовая модель М/М/1/С не позволяет учесть влияние протокола DCF и таким образом адекватно оценить

Получены зависимости показывающие влияние коллизий на время обработки пакета ТРВ в БКС. Полученные расчётные соотношения составляют систему уравнений, для решения которых требуется использование численных методов, что усложняет их использование для практического применения. Поэтому предложена методика перехода от модели СМО М/М/1/С к модели М/Г/1/С.

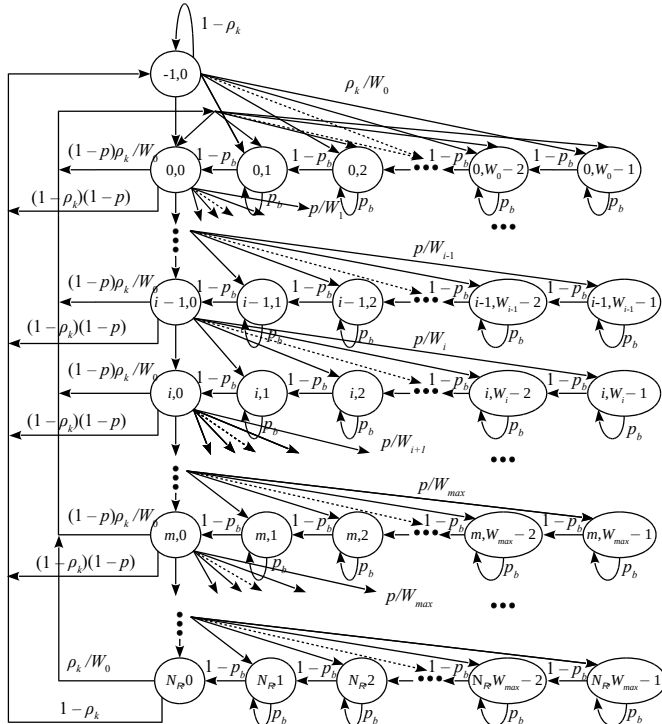


Рис. 5. Цепь Маркова, описывающая изменения состояний беспроводной станции

Классическая модель СМО класса М/М/1/С в качестве базовой модели БЛВС рассматривает БКС как одноканальную СМО с ограниченной очередью, содержащую  $S$  мест. Поскольку распределение времени обслуживания ТРВ в БЛВС неизвестно, используется следующее приближение. На основании формул Поллачека–Хинчина путём адаптации формул расчёта вероятности

состояний системы за счёт коэффициента  $\gamma$  получены следующие расчётные соотношения.

$$\gamma = (1 + C_{\text{в}}^2)/2 = (1 + \sigma_{\text{КП}}^2/T_{\text{КП}}^2)/2 \quad (3)$$

где  $C_{\text{в}}^2$  - коэффициент вариации,  $\sigma_{\text{КП}}^2$  - дисперсия времени передачи пакета по БК,  $T_{\text{КП}}^2$  - квадрат математического ожидания времени передачи пакета по БКС.

Для получения коэффициента  $\gamma$  разработан программный стенд для исследования характеристик функционирования БЛВС. Вероятности состояний, соответствующие модифицированной модели M/G/1/S, равны:

$$p'_i = \frac{\alpha^i \cdot \gamma^{\lfloor \frac{i}{2} \rfloor}}{\sum_{i=0}^{S+1} \alpha^i \gamma^{\lfloor \frac{i}{2} \rfloor}} \quad (4)$$

Интенсивность  $u$  доставки пакетов зависит от входной интенсивности  $A$ , которая уменьшается в результате потери пакетов до помещения в очередь, затем увеличивается из-за коллизий, а затем уменьшается из-за отказа в передаче тех пакетов, которые были отправлены неудачно повторно максимальное количество раз:

$$u = A \cdot (1 - p_o) \cdot (1 + p_c) \cdot (1 - p_d) \quad (5)$$

где  $p_c$  — вероятность коллизии пакета в БКС,  $p_o$  — вероятность потери пакета в БЛВС (удаление из очереди),  $p_d$  — вероятность потери пакета в БКС (превышение максимального числа попыток передачи пакета).

Формулы расчёта вероятностей состояний (4) позволяют найти математическое ожидание количества  $n'$  пакетов в системе:

$$n' = \sum_{i=1}^{S+1} i \cdot p'_i \quad (6)$$

Время  $T$  доставки пакета ТРВ с учётом накладных расходов канального протокола определяется соотношением:

$$T = n' / u' \quad (7)$$

где  $u'$  – интенсивность доставки пакетов ТРВ.

Для численных значений параметров IEEE 802.11g,  $Q = 100$ ,  $K = \{2, 20\}$ ,  $A = \{1, 8000\}$  получены зависимости рис. 6 и рис. 7:

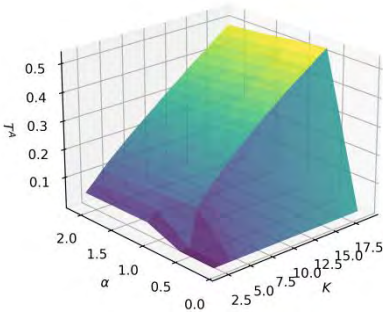


Рис. 6. Зависимость времени  $T(\alpha, K)$  доставки пакета ТРВ от коэффициента загрузки и количества беспроводных станций ( $Q = 100$ )

Установлено, что:

1. Вероятность коллизии пакета не является постоянной величиной и зависит от загрузки и количества беспроводных станций.
2. Коэффициент, необходимый для перехода от модели  $M/M/1/S$  к модели  $M/G/1/S$ , изменяется в зависимости от загрузки БЛВС и количества беспроводных станций.
3. Вероятность коллизий пакета и коэффициент, необходимый для перехода от модели  $M/M/1/S$  к модели  $M/G/1/S$ , могут быть получены с помощью исследования БЛВС с заданными параметрами и характеристиками.
4. Интенсивность обслуживания линейно возрастает до  $\alpha \approx 0.56$ , а затем является постоянной. Время доставки пакета трафика увеличивается при росте интенсивности или количества беспроводных станций.

**В третьей главе** разработан программный исследовательский стенд для оценки времени успешной доставки пакета ТРВ в БЛВС, интенсивности доставки трафика и потерь. Программный исследовательский стенд должен включать настройки канального протокола, соответствующие исследуемой сети. Стенд реализует имитационную модель сети, представленной на рис. 1. Для построения стенда выбран программный комплекс ns-3 – набор библиотек, написанных на языке C++, предназначенных для

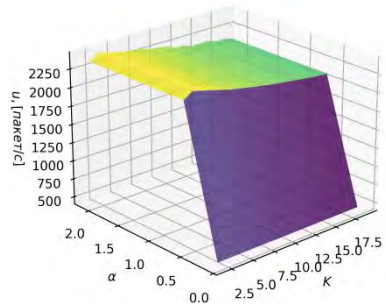


Рис. 7. Зависимость интенсивности  $u(\alpha, K)$  доставки от коэффициента загрузки и количества беспроводных станций ( $Q = 100$ )

проведения имитационного моделирования сетей передачи данных. Программный комплекс ns-3 обеспечивает низкий уровень абстракции, позволяющий обеспечить соответствие программных компонентов реальным компонентам сетей передачи данных, а также включает реализации компонентов для сетей передачи данных, в том числе LTE и Wi-Fi. В программном комплексе ns-3 существуют базовые абстракции компонентов для разработки модели вычислительной сети, которые были использованы в программном исследовательском стенде. Архитектура разработанного исследовательского стенда включает в себя программный блок «Стенд Моделирования» (состоит из модуля настройки, описывающего параметры настройки моделирования корпоративной БЛВС, и модуля генератора, осуществляющего генерацию входного трафика с экспоненциальным распределением времени интервалов поступления пакетов ТРВ) и программный блок «Анализ результатов моделирования», позволяющий получить вероятностно-временные характеристики функционирования корпоративной БЛВС (программный блок написан на языке Python).

Для апробации модели и программного исследовательского стенда разработан программно-аппаратный исследовательский стенд корпоративной БЛВС. Разработанный стенд реализует БЛВС, представленную на рис. 1. С помощью разработанного программно-аппаратного исследовательского стенда произведена верификация ММ рис. 8-9 и разработанного программного исследовательского стенда на основе ns-3 рис. 10-11.

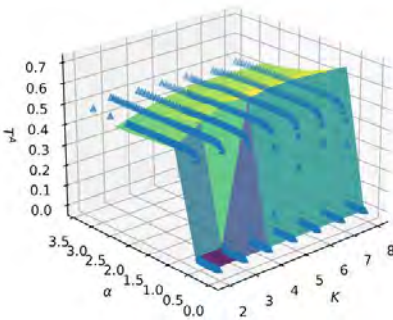


Рис. 8. Сравнение времени успешной доставки пакета ТРВ, полученного с помощью ММ и программно-аппаратного стенда. ( $Q = 1000$ )

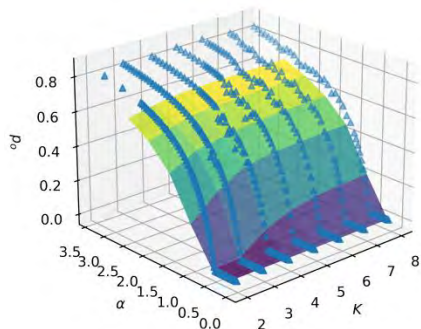


Рис. 9. Сравнение вероятности потерь, полученного с помощью ММ и программно-аппаратного стенда. ( $Q = 1000$ )

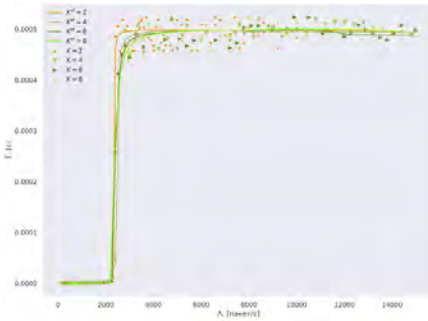


Рис. 10. Сравнение времени успешной доставки пакета ТРВ для программно-аппаратного и исследовательского стенда.

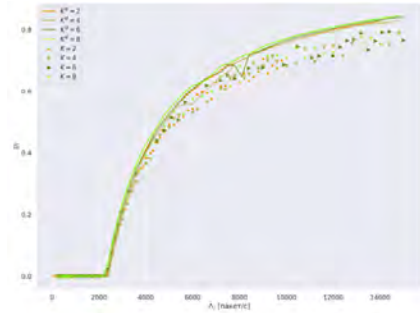


Рис. 11. Сравнение вероятности потери пакета в БЛВС для программно-аппаратного и исследовательского стенда

Разработана методика исследования функциональных характеристик корпоративной БЛВС с помощью программного исследовательского стенда. Описаны параметры и характеристики корпоративной БЛВС, которые используются для настройки и считывания состояния БЛВС в исследовательских стендах. С помощью программного исследовательского стенда получены характеристики функционирования корпоративной БЛВС для широкого диапазона интенсивности трафика ТРВ, количества беспроводных станций и параметров протоколов управления доступом к БКС. Получены численные значения параметров для оценки качества обслуживания трафика в корпоративной беспроводной локальной вычислительной сети, которые предназначены для разработчиков и системных администраторов БЛВС. В выводах к главе представлен анализ полученных характеристик.

**В четвёртой главе** предложен единый метод исследования характеристик функционирования БЛВС, обслуживающей ТРВ, который включает обобщение результатов исследования главы 2 и главы 3, разработанные методики в главе 4.

Разработана и описана методика оценки качества обслуживания ТРВ в корпоративных БЛВС. Под оценкой качества доставки трафика подразумевается оценка характеристик функционирования БЛВС, которая позволяет определить гарантированное время



доставки трафика, вероятность потерь пакетов трафика и интенсивность доставки пакетов трафика.

Параметры функционирования БЛВС можно получить, используя либо стандартные протоколы удалённого управления сетевыми устройствами (ПУУСУ), либо данные систем управления сетью (СУС), использующих ПУУСУ. В данной главе предложены алгоритмы вычисления характеристик функционирования БЛВС и шаблона настройки для СУС Zabbix 4.2 для сбора необходимых характеристик.

Методика оценки качества доставки трафика в корпоративной беспроводной локальной вычислительной сети состоит из следующих шагов:

- используя исследовательский стенд корпоративной БЛВС провести исследование и получить численные табличные значения для характеристик функционирования БЛВС;
- используя программные счётчики, рассчитать характеристики функционирования БЛВС;
- определить время гарантированной доставки пакета трафика.

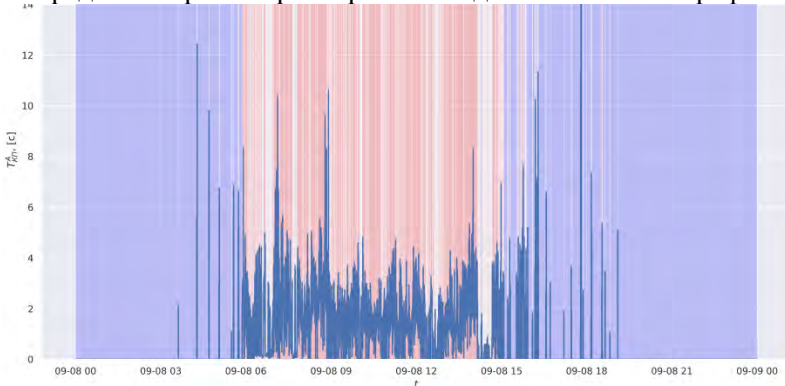


Рис. 12. Время успешной доставки трафика на суточном графике. Проведён анализ результатов оценки качества обслуживания ТРВ сетевых приложений на примере университетской корпоративной БЛВС НИУ «МЭИ». Для сбора характеристик функционирования БЛВС использовано СУС Zabbix 4.2. Выделены географические области (по расположению точек доступа) и временные интервалы на суточных графиках, когда не выполняются заданные условия

доставки трафика ТРВ. На рис. 12 представлен пример расчёта времени успешной доставки трафика на суточном графике. Красным выделены временные отрезки, когда условия качественной доставки не выполняются, в этом случае пользователи испытывают проблемы (прерывания связи, зависание, пропадание звука). Предложена методика расчёта параметров БЛВС для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ. Проведён расчёт БЛВС для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ приложений подвижной техники. Разработан метод исследования характеристик корпоративной БЛВС.

**В заключении** приведены основные результаты проведённого исследования.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Представлен обзор современных тенденций в корпоративных БЛВС, которые сформировали новые требования к качеству обслуживания трафика. Проанализированы особенности канальных протоколов для корпоративных БЛВС стандарта IEEE 802.11, проведён анализ моделей и методов оценки характеристик функционирования корпоративных БЛВС, которые обслуживают ТРВ, сформулированы требования к новым моделям функционирования БЛВС.

Предложена и разработана математическая модель корпоративной БЛВС, обслуживающей ТРВ, получены расчётные соотношения, позволяющие оценить дополнительные характеристики функционирования БЛВС: время доставки пакета ТРВ, количество потерянных пакетов ТРВ, интенсивность доставки пакетов ТРВ. Расчёт дополнительных характеристик позволяет сетевым администраторам определить состояние сети, а также трудности при передаче ТРВ, определить пути модернизации БЛВС для повышения качества обслуживания ТРВ.

Разработан программный исследовательский стенд, позволяющий получить характеристики функционирования БЛВС для использования в расчётах. Разработана методика исследования характеристик функционирования корпоративной БЛВС с помощью исследовательского программного стенда. Разработан программно-

аппаратный исследовательский стенд для верификации программного исследовательского стенда.

Предложена и разработана методика оценки качества обслуживания ТРВ в корпоративных БЛВС. Методика апробирована на данных трафика сетевых приложений университетской корпоративной БЛВС НИУ «МЭИ». Предложена методика расчёта параметров БЛВС для обеспечения требуемого качества обслуживания ТРВ. Методика апробирована на данных предприятия АО «ВИСТ ГРУПП». Разработан метод исследования характеристик функционирования корпоративной БЛВС, который сочетает математическое моделирование и натурно-имитационные эксперименты. Предложенный метод исследования позволяет оценить качество обслуживания ТРВ в исследуемой БЛВС и выработать рекомендации по изменению её конфигурации для повышения качества обслуживания ТРВ.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях из перечня ВАК**

1. Руденкова М. А., Абросимов Л. И.. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОКОЛОВ DCF И PCF БЕСПРОВОДНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ COMPARATIVE ANALYSIS OF DCF AND PCF OVER THE WIRELESS LAN. . Журнал «Информатизация образования и науки» № 4(44) (октябрь 2019 г.).

2. Руденкова М. А., Хаю Хуссейн, Абросимов Л. И.. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКИ ТРАФИКА В КОРПОРАТИВНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ. Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. №5. 2020 г. Страницы: 38-49.

3. Абросимов Л.И., Орлова М.А., Хаю Х. Архитектура и программная реализация исследовательского стенда корпоративной беспроводной локальной вычислительной сети. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ И СИСТЕМЫ № 1 за 2021 год. с. 172-179.

### **Статьи в изданиях, входящих в Web of Science, Scopus**

4. Rudenkova M., Khayou H., Abrosimov L.I. (2020) Investigation of the Guaranteed Traffic Rate in Enterprise WLAN. In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1337. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66242-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66242-4_6)

5. M. Rudenkova, "A Methodology of Modeling The IEEE 802.11 Wireless LAN Using ns-3," 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111782.

### **Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях**

6. Руденкова М. А., Абросимов Л. И.. Измерение вероятностно-временных параметров для оценки пропускной способности Wi-Fi сети. Сб. трудов международной научной конференции "Информационные средства и технологии" М.:МЭИ (ТУ), 2013.- С. 57-64.

7. Руденкова М. А., Абросимов Л. И.. Multiple parameter optimization of the Wi-Fi channel. Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2013), Moscow: JSC "TECHNOSPERA", 2013 - С.126-133./ Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. М.:Техносфера, 2013- С.126-133.

8. Руденкова М. А., Абросимов Л. И.. Analysis of throughput wireless media and settings for access point data layer. Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016) материалы Девятнадцатой международной научной конференции: в 3 томах. Под общей редакцией В. М. Вишневого и К. Е. Самуилова. 2016.

9. Rudenkova M.A., Khayou H., Abrosimov L.I. A METHODOLOGY FOR ADAPTING WIRELESS CHANNEL RESOURCES TO THE LOAD BY SWITCHING BETWEEN MEDIUM ACCESS PROTOCOLS. Proceedings of the 23th International Conference, Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2020, место издания Moscow, Russia). М.: Техносфера, с. 338-346