

**Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича**

**Парамонов А.И., Маколкина М.А., Кирич к Р.В.,
Выборнова А.И.**

**Математические модели в сетях связи
Раздел: Лабораторный практикум**

Учебное пособие

Направление подготовки 09.03.04 Программная инженерия
основная профессиональная образовательная программа
Инфокоммуникационные технологии и системы связи
кафедра

СЕТЕЙ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ:

Санкт-Петербург

СПб ГУТ)))

2017

УДК 621.391

А.И. Парамонов, Маколкина М.А., Киричѐк Р.В., Выборнова А.И. Математические модели в сетях связи. Раздел Лабораторный практикум. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, 2017. – 58 с.

В пособии рассматриваются вопросы применения теоретических основ в практических методах моделирования телекоммуникационных систем и сетей в части параметров сетей связи и анализа трафика, овладение которыми будет полезно бакалаврам, занимающимся задачами проектирования и эксплуатации телекоммуникационных систем и сетей связи.

Пособие адресовано студентам, изучающим дисциплину “Математические модели в сетях связи ”. Направление подготовки 09.03.04 Программная инженерия.

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом университета, протокол № __/__ от __ января 2017г.

Рецензент: профессор, д.т.н. Кучерявый А.Е., зав кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

СПбГУТ - Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича является старейшим и известнейшим вузом Российской Федерации, общепризнанным лидером российской высшей школы в области подготовки специалистов для отрасли связи и телекоммуникаций. В университете актуализированы, оптимизированы и аккредитованы основные направления и профили подготовки бакалавров, магистров и специалистов, а также выпускников колледжей для отраслей телекоммуникаций и ИТ – отрасли. Реализуется система непрерывного образования «лицей-колледж-университет» на основе интегрированных профильных образовательных программ.

© СПбГУТ, 2017

© А.И. Парамонов, М.А. Маколкина, Р.В. Киричѐк, А.И. Выборнова, 2017

Содержание

Введение.....	6
1 Лабораторная работа № 1 Моделирование СМО с отказами в AnyLogic ..	7
1.1 Цель работы и изучаемы вопросы	7
1.2 Подготовка к работе	7
1.3 Задание на самостоятельную работу	7
1.4 Задание на лабораторную работу	8
1.5 Содержание отчета	8
1.6 Контрольные вопросы.....	8
2 Лабораторная работа № 2 Моделирование СМО с ожиданием в AnyLogic	9
2.1 Цель работы и изучаемы вопросы	9
2.2 Подготовка к работе	9
2.3 Задание на самостоятельную работу	9
2.4 Задание на лабораторную работу	10
2.5 Содержание отчета	10
2.6 Контрольные вопросы.....	10
3 Лабораторная работа № 3 Изучение системы имитационного моделирования OMNeT++	11
3.1 Цель работы и изучаемы вопросы	11
3.2 Подготовка к работе	11
3.3 Задание на самостоятельную работу	11
3.4 Задание на лабораторную работу	12
3.5 Содержание отчета	12
3.6 Контрольные вопросы.....	12
4 Лабораторная работа № 4 Построение модели СМО в OMNeT++ (использование IDE)	13
4.1 Цель работы и изучаемы вопросы	13
4.2 Подготовка к работе	13
4.3 Задание на самостоятельную работу	14
4.4 Задание на лабораторную работу	14
4.5 Содержание отчета	14
4.6 Контрольные вопросы.....	14
5 Лабораторная работа № 5 Модель канального уровня (Ethernet) в OMNeT++	15

5.1	Цель работы и изучаемы вопросы	15
5.2	Подготовка к работе	15
5.3	Задание на самостоятельную работу	15
5.4	Задание на лабораторную работу	15
5.5	Содержание отчета	16
5.6	Контрольные вопросы.....	16
6	Лабораторная работа № 6 Построение модели протокола TCP (транспортный уровень) в OMNeT++	17
6.1	Цель работы и изучаемы вопросы	17
6.2	Подготовка к работе	17
6.3	Задание на самостоятельную работу	17
6.4	Задание на лабораторную работу	17
6.5	Содержание отчета	18
6.6	Контрольные вопросы.....	18
7	Лабораторная работа №7 Исследование сети беспроводного широкополосного доступа в OMNeT++	19
7.1	Цель работы и изучаемы вопросы	19
7.2	Подготовка к работе	19
7.3	Задание на самостоятельную работу	19
7.4	Задание на лабораторную работу	20
7.5	Содержание отчета	20
7.6	Контрольные вопросы.....	20
8	Лабораторная работа № 8. Анализ параметров трафика сети передачи данных	21
8.1	Цель работы и изучаемы вопросы	21
8.2	Подготовка к работе	21
8.3	Задание на самостоятельную работу	21
8.4	Задание на лабораторную работу	22
8.5	Содержание отчета	22
8.6	Контрольные вопросы.....	22
9	Лабораторная работа № 9. Расчет пропускной способности линии связи 23	
9.1	Цель работы и изучаемы вопросы	23
9.2	Подготовка к работе	24
9.3	Задание на самостоятельную работу	24

9.4	Задание на лабораторную работу	24
9.5	Содержание отчета	24
9.6	Контрольные вопросы.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	.....	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	.....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	.....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	.....	106

Введение

В настоящем пособии даются указания по выполнению лабораторного практикума по курсу «Математические модели в сетях связи». В лабораторном практикуме предполагается решение основных задач, связанных с моделированием элементов сетей связи в задачах построения телекоммуникационных систем. В лабораторном практикуме рассмотрены основные математические модели, необходимые для выбора требуемого объема ресурсов сети связи при заданных требованиях к качеству обслуживания при известных параметрах абонентского трафика. В работах предполагается решение задач моделирования сетей связи и их элементов в целях оценки параметров трафика, качества его обслуживания, распределения трафика по направлениям связи, анализа структуры сети, оценки необходимой пропускной способности линий связи с учетом требований к качеству обслуживания.

Решаемые в работах задачи направлены на изучение и закрепление знаний в области анализа и построения сетей связи.

Методические указания содержат

- формулировку цели работы и решаемых задач,
- описание подготовительного этапа,
- описание заданий на подготовительную самостоятельную работу,
- описание заданий на выполнение лабораторной работы,
- руководство по выполнению работы,
- описание содержания отчета по работе,
- контрольные вопросы для самопроверки.

Методические указания также содержат:

- список рекомендуемой литературы по тематикам выполняемых работ,
- пример оформления лабораторной работы.

1 Лабораторная работа № 1

Моделирование СМО с отказами в AnyLogic

1.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение основ работы с системой имитационного моделирования AnyLogic, построение модели СМО с отказами и исследование ее функционирования.

Изучаемые вопросы:

1. Система имитационного моделирования AnyLogic. Принципы построения дискретных событийных имитационных моделей.

2. Понятие абонентской нагрузки (объем нагрузки, интенсивность нагрузки, удельная абонентская нагрузка, час наибольшей нагрузки, колебания нагрузки, поступающая, обслуженная и потерянная нагрузки).

3. Показатели качества функционирования сети связи. Вероятность потерь (потери) в сетях с коммутацией каналов.

4. Математическая модель СМО с отказами. (Первая формула Эрланга). Применение СМО с отказами для моделирования сети с коммутацией каналов.

5. Анализ результатов имитационного моделирования. Точность оценок параметров, полученных на основе результатов имитационного моделирования.

1.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе

1. Сети связи как СМО
2. Понятие абонентской нагрузки
3. Показатели качества функционирования сети связи с коммутацией каналов
4. Математические модели, применяемые для расчета параметров сетей связи с коммутацией каналов
5. Пример оформления Лабораторной работы №1

1.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования AnyLogic на персональный компьютер (если система еще не установлена);
2. Изучить документацию AnyLogic в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;
3. Подготовить средства для вычисления первой формулы Эрланга (написать процедуру, скрипт или иные средства, позволяющие произвести вычисления);

4. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

1.4 Задание на лабораторную работу

1. Построить имитационную модель СМО с отказами (М/М/V)
2. Провести серию имитационных экспериментов и оценить зависимость вероятности потерь от количества обслуживаемых устройств и удельной интенсивности нагрузки y_0 . ($y_0=0,1; 0,2; \dots, 1$ Эрл) для различного количества обслуживаемых устройств ($V=10, 50, 100, 200, 500$).
3. Вычислить вероятность потерь по первой формуле Эрланга для заданных значений интенсивности нагрузки и количества обслуживаемых устройств.
4. Сравнить результаты имитационного моделирования и результаты расчета, сделать выводы.

1.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание модели СМО, аналитическая модель;
3. Описание имитационной модели СМО;
4. Результаты имитационного моделирования;
5. Результаты вычисления аналитической модели;
6. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования, выводы.

1.6 Контрольные вопросы

1. Понятие интенсивности нагрузки
2. Что такое объем нагрузки, интенсивность нагрузки
3. Удельная абонентская нагрузка
4. Понятие часа наибольшей нагрузки (ЧНН)
5. Продолжительность занятия.
6. Простейший поток заявок (вызовов), основные свойства простейшего потока.
7. Показатели качества обслуживания в сети телефонной связи.
8. Существующие нормативные значения на показатели качества обслуживания, нормативные документы.
9. Сеть как система массового обслуживания, математическая модель пучка соединительных линий.
10. Первая формула Эрланга.

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 1.

2 Лабораторная работа № 2

Моделирование СМО с ожиданием в AnyLogic

2.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение основ работы с системой имитационного моделирования AnyLogic, построение модели СМО с ожиданием и исследование ее функционирования.

Изучаемые вопросы:

1. Система имитационного моделирования AnyLogic. Принципы построения дискретных событийных имитационных моделей.
2. Понятие интенсивности нагрузки (объем нагрузки, интенсивность нагрузки, удельная интенсивность нагрузки, час наибольшей нагрузки, колебания нагрузки, поступающая, обслуженная и потерянная нагрузки).
3. Показатели качества функционирования сети с коммутацией пакетов. Время доставки пакета. Задержка доставки пакета, ее составляющие. Время ожидания начала обслуживания, время обслуживания.
4. Математические модели СМО с ожиданием. (Формула Полячека-Хинчина). Применение СМО с ожиданием для моделирования сети с коммутацией пакетов.
5. Анализ результатов имитационного моделирования. Точность оценок параметров, полученных на основе результатов имитационного моделирования.

2.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе

1. Сети связи как СМО
2. Понятие абонентской нагрузки
3. Показатели качества функционирования сети связи с коммутацией пакетов
4. Математические модели, применяемые для расчета параметров сетей связи с коммутацией пакетов
5. Пример оформления Лабораторной работы №2

2.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования AnyLogic на персональный компьютер (если система еще не установлена);
2. Изучить документацию AnyLogic в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;
3. Подготовить средства для вычисления первой формулы Полячека-Хинчина (написать процедуру, скрипт или иные средства, позволяющие произвести вычисления);

4. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

2.4 Задание на лабораторную работу

1. Последовательно построить имитационные модели СМО с ожиданием (М/М/1, М/D/1, две последовательно включенные модели М/М/1);
2. Провести серию имитационных экспериментов и оценить зависимость задержки начала обслуживания от интенсивности нагрузки ρ . ($\rho=0,1; 0,2; \dots, 0,95$ Эрл) для различных систем: М/М/1, М/D/1, две последовательно включенные модели М/М/1.
3. Вычислить задержки по формуле Полячека-Хинчина для заданных значений интенсивности нагрузки.
4. Сравнить результаты имитационного моделирования и результаты расчета, сделать выводы.

2.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание моделей СМО, аналитические модели;
3. Описание имитационных моделей СМО;
4. Результаты имитационного моделирования;
5. Результаты вычисления аналитических моделей;
6. Сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования, выводы.

2.6 Контрольные вопросы

1. Понятие интенсивности нагрузки
2. Что такое объем нагрузки, интенсивность нагрузки
3. Удельная абонентская нагрузка
4. Понятие часа наибольшей нагрузки (ЧНН)
5. Продолжительность занятия.
6. Простейший поток заявок (вызовов), основные свойства простейшего потока.
7. Показатели качества обслуживания в сети с коммутацией пакетов.
8. Существующие нормативные значения на показатели качества обслуживания, нормативные документы.
9. Сеть как система массового обслуживания, математическая модель СМО с ожиданием.
10. Формула Полячека-Хинчина.

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 2.

3 Лабораторная работа № 3

Изучение системы имитационного моделирования OMNeT++

3.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение основ работы с системой имитационного моделирования OMNeT++, построение простейшей модели и исследование ее функционирования.

Изучаемые вопросы:

1. Система имитационного моделирования OMNeT++. Принципы построения дискретных событийных имитационных моделей.
2. Основные этапы построения имитационной модели. Объекты описания модели: простые модули, комплексные (составные) модули, шлюзы.
3. Основные файлы описания модели (ned, ini, anf). Содержимое этих файлов. Этапы построения имитационной модели в командной строке.
4. Использование и создание простых модулей.
5. Анализ результатов имитационного моделирования. Средства анализа, лог-файлы, файлы статистики (файлы векторных и скалярных данных).

3.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе:

1. Общее описание OMNeT++;
2. Основные элементы модели, файлы модели;
3. Порядок подготовки файлов модели в командной строке;
4. Способы создания простых модулей;
5. Пример оформления Лабораторной работы №3.

3.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования OMNeT++ на персональный компьютер (если система еще не установлена);
2. Изучить документацию OMNeT++ в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;
3. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

3.4 Задание на лабораторную работу

1. Создать простой модуль;
2. Руководствуясь описанием из учебного пособия, создать имитационную модель «tictoc» в командной строке;
3. Запустить имитационный эксперимент и изучить назначение органов управления процессом имитации и средства анализа выполнения этого процесса.
4. Сделать скриншоты исходной и измененных моделей, дать словесное описание выполненным изменениям.

3.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание исходной модели «tictoc»;
3. Описание модифицированной модели «tictoc»;
4. Краткое описание наблюдаемых результатов;
5. Выводы.

3.6 Контрольные вопросы

1. Назначение системы OMNeT++;
2. Основные возможности OMNeT++;
3. Основные элементы построения имитационной модели OMNeT++;
4. Порядок построения имитационной модели в командной строке OMNeT++;
5. Возможности анализа выполнения имитационной модели;
6. Возможности управления выполнением имитационной модели в OMNeT++.

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 3.

4 Лабораторная работа № 4

Построение модели СМО в OMNeT++ (использование IDE)

4.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение основ работы с системой имитационного моделирования OMNeT++, построение модели СМО и исследование ее функционирования.

Изучаемые вопросы:

1. Система имитационного моделирования OMNeT++. Принципы построения дискретных событийных имитационных моделей.

2. Основные этапы построения имитационной модели с помощью IDE OMNeT++. Объекты описания модели: простые модули, комплексные (составные) модули, шлюзы.

3. Основные файлы описания модели (ned, ini, anf). Содержимое этих файлов. Этапы построения имитационной модели в IDE.

4. Использование библиотечных модулей в IDE.

5. Анализ результатов имитационного моделирования. Средства анализа, файлы статистики (файлы векторных и скалярных данных, построение графиков и гистограмм).

4.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе, а также документацию OMNeT++:

1. Общее описание IDE OMNeT++;
2. Основные элементы модели, файлы модели;
3. Порядок создания модели с использованием IDE;
4. Способы задания параметров элементов модели;
5. Способы сбора статистики;
6. Аналитические модели (M/M/1, M/D/1, M/G/1, M/M/1/k)
7. Пример оформления Лабораторной работы №4.

4.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования OMNeT++ на персональный компьютер (если система еще не установлена);
2. Изучить документацию по IDE OMNeT++ в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;
3. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

4.4 Задание на лабораторную работу

1. Создать имитационную модель однофазной СМО с ожиданием; Задать значения интенсивности нагрузки ($\gamma=0,1; 0,2; \dots, 0,95$ Эрл);
2. Провести серию имитационных экспериментов для оценки среднего времени ожидания и функции распределения времени ожидания.
3. Модифицировать модель, изменив количество фаз обслуживания, согласно номеру варианта.
4. Провести серию имитационных экспериментов для оценки среднего времени ожидания и функции распределения времени ожидания многофазной СМО.
5. Сравнить результаты, полученные в ходе экспериментов с результатами, полученными с помощью аналитических моделей.

4.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание модели СМО;
3. Описание результатов имитационных экспериментов;
4. Описание многофазной СМО;
5. Описание результатов имитационных экспериментов с многофазной СМО;
6. Выводы.

4.6 Контрольные вопросы

1. Этапы построения имитационной модели в IDE OMNeT++;
2. Основные файлы модели, их назначение;
3. Основные элементы построения имитационной модели СМО OMNeT++;
4. Возможности проведения имитационных экспериментов, параметры имитационных экспериментов;
5. Возможности анализа результатов имитационного моделирования (средние значения, графики, гистограммы);

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 4.

5 Лабораторная работа № 5

Модель канального уровня (Ethernet) в OMNeT++

5.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение технологии канального уровня сети связи на примере Ethernet, построение имитационной модели и исследование ее свойств.

Изучаемые вопросы:

1. Технологии сетей связи канального уровня. Технология Ethernet.
2. Библиотека INET OMNeT++.
3. Модели узлов связи и линий связи.
4. Построение имитационной модели Ethernet в IDE.
5. Анализ результатов имитационного моделирования.

5.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе, а также документацию OMNeT++:

1. Общее описание IDE OMNeT++;
2. Описание INET OMNeT++;
3. Порядок создания модели с использованием INET в IDE OMNeT++;
4. Способы задания параметров элементов модели;
5. Способы сбора статистики;
6. Пример оформления Лабораторной работы №5.

5.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования OMNeT++ и INET на персональный компьютер (если они еще не установлены);
2. Изучить документацию по INET OMNeT++ в объеме, достаточном для построения имитационной модели;
3. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

5.4 Задание на лабораторную работу

1. Создать имитационную модель сети Ethernet, состоящую из нескольких хостов, соединенных друг с другом с использованием коммутатора;

2. Выполнить имитационный эксперимент, получить статистические данные о задержке доставки пакета между хостами.
3. Выполнить анализ результатов, полученных в ходе экспериментов и пояснить значение оцениваемых параметров.

5.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание модели сети из двух узлов;
3. Описание модели сети из нескольких узлов и коммутатора;
4. Описание результатов имитационных экспериментов;
6. Выводы.

5.6 Контрольные вопросы

1. Этапы построения имитационной модели в IDE OMNeT++;
2. Назначение библиотеки INET;
3. Основные элементы построения имитационных моделей с использованием INET;
4. Возможности проведения имитационных экспериментов, параметры имитационных экспериментов, сбор статистики, использование pcap файлов;
5. Возможности анализа результатов имитационного моделирования (средние значения, графики, гистограммы);

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 5.

6 Лабораторная работа № 6

Построение модели протокола TCP (транспортный уровень) в OMNeT++

6.1 Цель работы и изучаемые вопросы

Цель работы: изучение протоколов транспортного уровня. Построение имитационной модели TCP и исследование ее функционирования.

Изучаемые вопросы:

1. Протоколы транспортного уровня. Протокол TCP.
2. Библиотека INET OMNeT++.
3. Модели узлов связи и линий связи.
4. Построение имитационной модели TCP в IDE.
5. Анализ результатов имитационного моделирования.

6.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе, а также документацию OMNeT++:

1. Общее описание IDE, INET OMNeT++;
2. Основные элементы модели, файлы модели;
3. Порядок создания модели с использованием IDE, INET;
4. Способы задания параметров элементов модели;
5. Способы сбора статистики;
6. Принцип работы протокола TCP.
7. Пример оформления Лабораторной работы №6.

6.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования OMNeT++, INET на персональный компьютер (если они еще не установлены);
2. Изучить документацию по IDE, INET OMNeT++ в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;
3. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

6.4 Задание на лабораторную работу

1. Создать имитационную модель с двумя узлами (клиент, сервер);

2. Провести серию имитационных экспериментов для оценки средней величины задержки и пропускной способности канала.
3. Модифицировать модель, изменив количество узлов сети или битовую скорость канала (согласно номеру варианта).
4. Провести серию имитационных экспериментов для оценки среднего времени ожидания и пропускной способности канала.
5. Описать результаты, полученные в ходе экспериментов.

6.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание имитационной модели;
3. Описание результатов имитационных экспериментов;
4. Описание модифицированной имитационной модели;
5. Описание результатов имитационных экспериментов;
6. Выводы.

6.6 Контрольные вопросы

1. Этапы построения имитационной модели в IDE OMNeT++;
2. Основные файлы модели, их назначение;
3. Основные элементы построения имитационной модели СМО OMNeT++;
4. Возможности проведения имитационных экспериментов, параметры имитационных экспериментов;
5. Возможности анализа результатов имитационного моделирования (средние значения, графики, гистограммы);

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 6.

7 Лабораторная работа №7

Исследование сети беспроводного широкополосного доступа в OMNeT++

7.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: исследование пропускной способности сети беспроводного широкополосного доступа (IEEE 802.11g) методом имитационного моделирования.

Изучаемые вопросы:

1. Стандарт сети БШД IEEE 802.11
2. Протоколы транспортного уровня. Протокол TCP.
2. Библиотека INET OMNeT++.
3. Модели узлов связи и линий связи.
4. Построение имитационной модели в IDE.
5. Анализ результатов имитационного моделирования.

7.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Математические модели в сетях связи. Раздел Математическое моделирование» по вопросам, рассматриваемым в работе, а также документацию OMNeT++:

1. Описание стандарта IEEE 802.11
2. Общее описание IDE, INET OMNeT++;
3. Основные элементы модели, файлы модели;
4. Порядок создания модели с использованием IDE, INET;
5. Способы задания параметров элементов модели;
6. Способы сбора статистики;
7. Принцип работы протокола TCP.
8. Пример оформления Лабораторной работы №7.

7.3 Задание на самостоятельную работу

1. Установить систему имитационного моделирования OMNeT++, INET на персональный компьютер (если они еще не установлены);
2. Изучить документацию по IDE, INET OMNeT++ в объеме, достаточном для построения дискретной событийной модели;

3. Подготовить средства оформления отчета по лабораторной работе (текстовый редактор, средства построения графиков).

7.4 Задание на лабораторную работу

1. Создать имитационную модель сети беспроводного широкополосного доступа с одной точкой доступа, включающей DHCP сервер и шлюз, несколькими клиентами и хостом, подключенным к точке доступа с помощью проводного соединения;
2. Провести серию имитационных экспериментов для оценки средней величины пропускной способности TCP соединения.
3. Модифицировать модель, изменив количество клиентов сети.
4. Провести серию имитационных экспериментов для оценки средней пропускной способности канала.
5. Описать результаты, полученные в ходе экспериментов.

7.5 Содержание отчета

Титульный лист;

1. Исходные данные и требования (согласно варианту);
2. Описание имитационной модели;
3. Описание результатов имитационных экспериментов;
4. Описание модифицированной имитационной модели;
5. Описание результатов имитационных экспериментов;
6. Выводы.

7.6 Контрольные вопросы

1. Этапы построения имитационной модели в IDE OMNeT++;
2. Основные файлы модели, их назначение;
3. Основные элементы построения имитационной модели СМО OMNeT++;
4. Возможности проведения имитационных экспериментов, параметры имитационных экспериментов;
5. Возможности анализа результатов имитационного моделирования (средние значения, графики, гистограммы);

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 7.

8 Лабораторная работа № 8.

Анализ параметров трафика сети передачи данных

8.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение свойств трафика в сети передачи данных, параметров трафика, характеристик потоков трафика, методов измерений и анализа параметров трафика и качества обслуживания.

Изучаемые вопросы:

1. Трафик сетей передачи данных (услуги связи, особенности трафика различных услуг связи, параметры трафика – интенсивность трафика, интенсивность пакетов, длины пакетов данных).
2. Методы анализа свойств трафика (измерения, план проведения измерений, объем выборки, контроль данных измерений, анализ данных, представление результатов измерений).
3. Поточковые характеристики трафика (распределение числа пакетов данных, распределение интервалов времени между пакетами, распределение длины пакета – методы измерения и анализа).
4. Математические модели трафика (простейший поток, другие виды потоков, самоподобные потоки, понятие фрактального трафика – параметр Херста).
5. Методы анализа качества обслуживания (измерения задержки, коэффициента потерь – методы проведения измерений и анализа результатов).

8.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров и анализ трафика» по вопросам, рассматриваемым в работе

1. Трафик сети передачи данных
2. Методы анализа свойств трафика
3. Поточковые характеристики трафика
4. Математические модели трафика
5. Методы анализа качества обслуживания

8.3 Задание на самостоятельную работу

1. Выбрать исследуемую услугу согласно заданию (варианту)
2. Изучить основные характеристики и параметры трафика
3. Изучить основные методы работы с программным обеспечением, используемым в лабораторной работе (Wireshark, табличный процессор)
4. Изучить методы обработки результатов измерений

8.4 Задание на лабораторную работу

1. Подготовить средства измерений трафика
2. Произвести измерения параметров трафика
4. Выполнить обработку результатов измерений
5. Вычислить интервальные оценки основных параметров трафика
6. Сформулировать выводы

8.5 Содержание отчета

1. Описание модельной сети и условий проведения измерений
2. Проведение измерений и подготовка данных
3. Вычисление оценок параметров трафика
4. Доверительные интервалы для полученных оценок
5. Результаты оценки параметров трафика

8.6 Контрольные вопросы

1. Понятие трафика
2. Основные параметры трафика в сети передачи данных
3. Основные показатели качества обслуживания трафика
5. Математические модели описания трафика
5. Методы измерения параметров трафика
6. Основные виды ошибок
7. Точечные и интервальные оценки параметров трафика
8. Доверительный интервал, способы вычисления
9. Связь между объемом выборки и точностью оценок параметров
10. Доверительная вероятность, связь с шириной доверительного интервала

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 8.

9 Лабораторная работа № 9.

Расчет пропускной способности линии связи

9.1 Цель работы и изучаемы вопросы

Цель работы: изучение принципов построения сети телефонной связи с коммутацией каналов, свойств абонентского трафика, показателей качества функционирования и методов расчета параметров сети.

Изучаемые вопросы:

1. Структура сетей телефонной связи (автоматические телефонные станции, узлы входящих и исходящих сообщений, местные, зонавые, междугородные и международные сети, понятие первичной и вторичной сетей связи, современное состояние в области построения сетей телефонной связи).

2. Понятие абонентской нагрузки (объем нагрузки, интенсивность нагрузки, удельная абонентская нагрузка, час наибольшей нагрузки, колебания нагрузки, поступающая, обслуженная и потерянная нагрузки).

3. Показатели качества функционирования сети телефонной связи (качество передачи речи, потери вызовов, методы оценки, существующие требования и нормативные значения, рекомендации ИТУ-Т и нормативные отраслевые документы).

4. Математические модели, применяемые для расчета параметров сетей телефонной связи (модель потока телефонных вызовов – понятие простейшего потока, модель системы обслуживания – 1 формула Эрланга, применение для расчета необходимой канальной емкости соединительных линий).

5. Показатели надежности сети связи (коэффициент готовности, структурная надежность сети связи, математические модели, методы расчета).

9.2 Подготовка к работе

Изучить теоретический материал из рекомендованной литературы и учебного пособия «Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров и анализ трафика» по вопросам, рассматриваемым в работе

1. Структура сети телефонной связи
2. Понятие абонентской нагрузки
3. Показатели качества функционирования сети телефонной связи
4. Математические модели, применяемые для расчета параметров сетей телефонной связи
5. Показатели надежности сетей телефонной связи
6. Пример оформления Лабораторной работы №9

9.3 Задание на самостоятельную работу

1. Выбрать параметры узла связи согласно заданию (варианту)
2. Выбрать параметры абонентской нагрузки
3. Выбрать нормативное значение коэффициента потерь
4. Подготовить средства для вычисления необходимого число соединительных линий (каналов), для подключения узла к сети связи

9.4 Задание на лабораторную работу

1. Вычислить параметры трафика узлов связи
На основе данных о количестве абонентов, удельной абонентской нагрузке, и коэффициентах распределения трафика вычислить интенсивность абонентской нагрузки, производимой в заданных направлениях связи.
2. Вычислить нормативную величину коэффициента потерь
4. Вычислить коэффициенты распределения трафика
5. Вычислить распределение трафика по линиям связи
6. Вычислить количество линий (каналов) связи

9.5 Содержание отчета

Титульный лист

1. Исходные данные и требования (согласно варианту)
2. Модель сети связи
3. Трафик, производимый в узлах связи
4. Коэффициенты распределения трафика
5. Распределение трафика по линиям связи

6. Расчет количества линий (каналов) связи

9.6 Контрольные вопросы

1. Понятие телефонной нагрузки
2. Что такое величина нагрузки, интенсивность нагрузки
3. Удельная абонентская нагрузка
4. Понятие часа наибольшей нагрузки (ЧНН)
5. Продолжительность занятия.
6. Простейший поток заявок (вызовов), основные свойства простейшего потока.
7. Показатели качества обслуживания в сети телефонной связи.
8. Существующие нормативные значения на показатели качества обслуживания, нормативные документы.
9. Сеть как система массового обслуживания, математическая модель пучка соединительных линий.
10. Первая формула Эрланга.

Пример оформления отчета по работе приведен в Приложении 9.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Варианты заданий на лабораторную работу №1

2. Таблица П.1.1 - Параметры СМО

№ Варианта	Номера в таблицах П1.2 и П.1.3	
	Набор значений удельной абонентской нагрузки из таблицы П.1.2	Количество обслуживаемых устройств из таблицы П.1.3.
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	4	1
5	5	1
6	6	2
7	7	2
8	8	2
9	9	2
10	10	2
11	1	3
12	2	3
13	3	3
14	4	3
15	5	3
16	6	4
17	7	4
18	8	4
19	9	4
20	10	4
21	1	5
22	2	5
23	3	6
24	4	6
25	5	7
26	6	7
27	7	8
28	8	8
29	9	9
30	10	10

Таблица П.1.2 – Набор значений удельной абонентской нагрузки для различных вариантов

N	Номер по таблице П.1.1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,20	0,15	0,05	0,30	0,50	0,10	0,05	0,05	0,35	0,10
2	0,40	0,25	0,25	0,50	0,80	0,25	0,20	0,30	0,50	0,40
3	0,60	0,35	0,45	0,70	1,10	0,40	0,35	0,55	0,65	0,70
4	0,80	0,45	0,65	0,90	1,40	0,55	0,50	0,80	0,80	1,00
5	1,00	0,55	0,85	1,10	1,70	0,70	0,65	1,05	0,95	1,30
6	1,20	0,65	1,05	1,30	2,00	0,85	0,80	1,30	1,10	1,60
7	1,40	0,75	1,25	1,50	2,30	1,00	0,95	1,55	1,25	1,90
8	1,60	0,85	1,45	1,70	2,60	1,15	1,10	1,80	1,40	2,20
9	1,80	0,95	1,65	1,90	2,90	1,30	1,25	2,05	1,55	2,50
10	2,00	1,05	1,85	2,10	3,20	1,45	1,40	2,30	1,70	2,80

Таблица П.1.3 – Набор значений количества обслуживающих устройств для различных вариантов

N	Номер по таблице П.1.1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	20	5	15	8	4	1	2	3	6
2	50	60	40	25	12	16	10	4	17	12
3	100	200	80	150	128	90	120	50	47	24
4	200	300	250	280	256	180	240	150	187	124
5	500	600	550	400	512	450	620	350	425	280

Пример оформления лабораторной работы №1

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №1
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Моделирование СМО с отказами

(пример отчета по лабораторной работе №1)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Характеристики и параметры СМО

Параметр	Ед.изм.	Значение
Количество обл. устройств	шт.	10, 50, 100, 200, 500
Удельная интенсивность нагрузки	Эрл	0,1; 0,2; 0,3, 0,4; 0,5; 0,6' 0,7' 0,8; 0,9; 0,95
Входящий поток	-	Простейший
Распределение времени обслуживания	-	Экспоненциальное
Среднее время обслуживания	ед. вр.	1

Структура модели

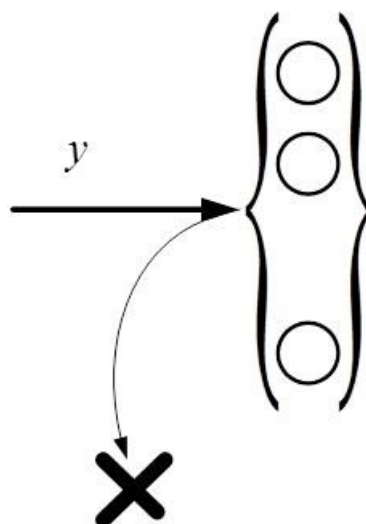


Рисунок 1 – Структура модели СМО

1 Построение имитационной модели СМО М/М/1

Имитационная модель включает в себя источник заявок (source), элемент выбора направления (SelectOutput), группу обслуживающих устройств, имитируемых элементами задержки (delay) и элемент завершения обслуженных заявок (sink) и элемент завершения неуспешных (потерянных) заявок (loss). Структура модели, построенной в AnyLogic, приведена на рисунке 2.

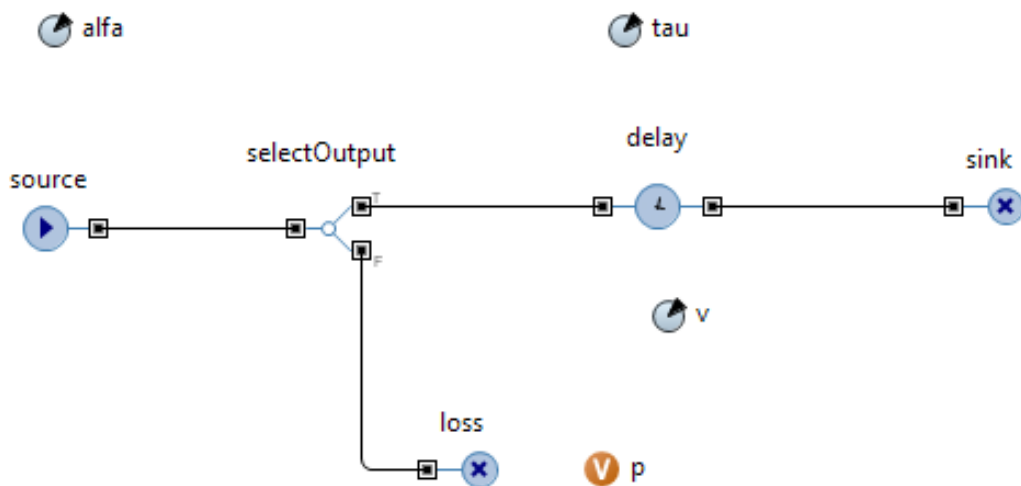


Рисунок 2 – Имитационная модель M/M/V

2 Имитационные эксперименты

(результаты имитационного моделирования)

Интенсивность входящего трафика (нагрузки), определяется как $y = V_i y_0$ Эрл (1)

где V_i - количество обслуживающих устройств (шт),

y_0 - интенсивность удельной нагрузки Эрл.

Результаты имитационного моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Интенсивности исходящего трафика АТС

Удельная интенсивность нагрузки, Эрл	Вероятность потерь для заданного количества обслуживающих устройств				
	10	50	100	200	500
0,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,4	0,0053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,5	0,0184	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,6	0,0431	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
0,7	0,0787	0,0033	0,0001	0,0000	0,0000
0,8	0,1217	0,0187	0,0040	0,0003	0,0000
0,9	0,1680	0,0541	0,0270	0,0103	0,0012
1,0	0,2146	0,1048	0,0757	0,0544	0,0348

4 Вычисление вероятности потерь (аналитическая модель)

Аналитическая модель - Первая формула Эрланга:

$$p \frac{y^v}{v!} - \sum_{i=0}^v \frac{y^i}{i!} \quad (2)$$

Результаты вычислений приведены в таблице 3.
Таблица 3 - Интенсивности исходящего трафика АТС

Удельная интенсивность нагрузки, Эрл	Вероятность потерь для заданного количества обслуживающих устройств				
	10	50	100	200	500
0,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,4	0,0053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,5	0,0184	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,6	0,0431	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
0,7	0,0787	0,0033	0,0001	0,0000	0,0000
0,8	0,1217	0,0187	0,0040	0,0003	0,0000
0,9	0,1680	0,0541	0,0270	0,0103	0,0012
1,0	0,2146	0,1048	0,0757	0,0544	0,0348

4 Анализ результатов моделирования

Сравнительная характеристика результатов имитационного моделирования приведена на рисунке 3.

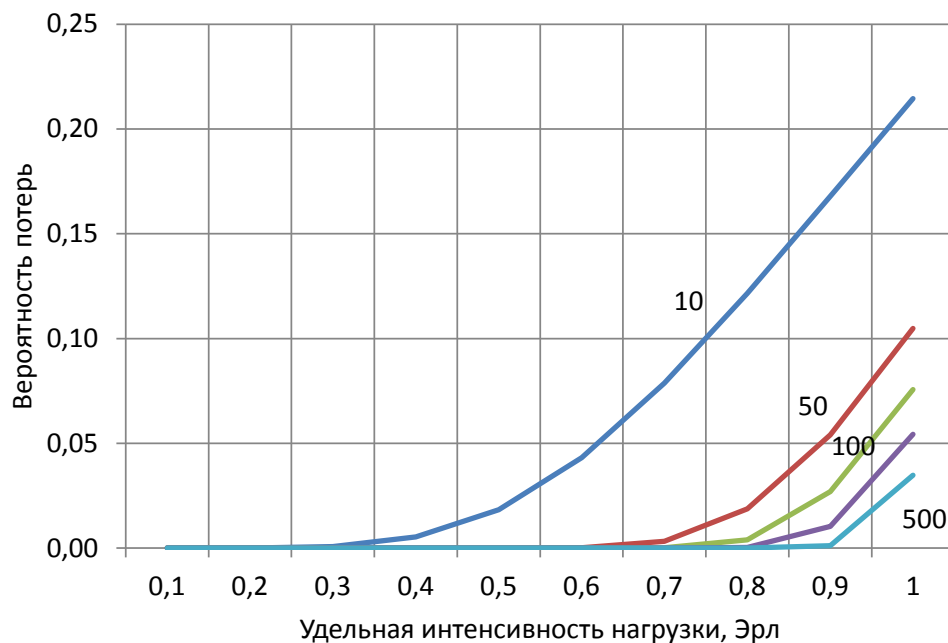


Рисунок 3 – Зависимость потерь от интенсивности нагрузки в СМО с отказами М/М/V

4 Выводы

1. Результаты оценки вероятности потерь с помощью имитационного моделирования близки к результатам оценки с помощью аналитической модели (1я формула Эрланга). Максимальная ошибка составила 0,1%.

2. С ростом интенсивности трафика вероятность потерь также увеличивается.

3. При большем количестве обслуживающих устройств, удельная интенсивность нагрузки может быть выше, при той же вероятности потерь, чем группе из меньшего количества устройств. Это говорит о том, что использование одного обслуживающего устройства может быть выше при их большем количестве.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты заданий на лабораторную работу №2

2. Таблица П.1.1 - Параметры СМО

№ Варианта	Номера в таблицах П1.2 и П.1.3	
	Набор значений удельной абонентской нагрузки из таблицы П.1.2	Количество обслуживаемых устройств из таблицы П.1.3.
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	4	1
5	5	1
6	6	1
7	7	1
8	8	1
9	1	2
10	2	2
11	3	2
12	4	2
13	5	2
14	6	2
15	7	2
16	8	2
17	1	3
18	2	3
19	3	3
20	4	3
21	5	3
22	6	3
23	7	3
24	8	3
25	1	4
26	2	4
27	3	4
28	4	4
29	5	4
30	6	4

Таблица П.1.2 – Набор значений удельной абонентской нагрузки для различных вариантов

N	Номер по таблице П.1.1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,05	0,03	0,02	0,07	0,11	0,01	0,12	0,08
2	0,15	0,14	0,13	0,17	0,21	0,12	0,20	0,18
3	0,25	0,25	0,24	0,27	0,31	0,23	0,28	0,28
4	0,35	0,36	0,35	0,37	0,41	0,34	0,36	0,38
5	0,45	0,47	0,46	0,47	0,51	0,45	0,44	0,48
6	0,55	0,58	0,57	0,57	0,61	0,56	0,52	0,58
7	0,65	0,69	0,68	0,67	0,71	0,67	0,60	0,68
8	0,75	0,80	0,79	0,77	0,81	0,78	0,68	0,78
9	0,85	0,91	0,90	0,87	0,91	0,89	0,76	0,88
10	0,95	0,97	0,98	0,97	0,95	0,93	0,94	0,98

Таблица П.1.3 – Параметры многофазной СМО

N фазы обслуживания	Номер по таблице П.1.1			
	1	2	3	4
1	M/M/1	M/M/1	M/D/1	M/D/1
2	M/M/1	M/D/1	M/M/1	M/D/1

Пример оформления лабораторной работы №2

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №2
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Моделирование СМО с ожиданием

(пример отчета по лабораторной работе №2)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Характеристики и параметры СМО

Параметр	Ед.изм.	Значение
Количество обл. устройств	шт.	1
Интенсивность нагрузки	Эрл	0,1; 0,2; 0,3, 0,4; 0,5; 0,6' 0,7' 0,8; 0,9; 0,95
Входящий поток	-	Простейший
Распределение времени обслуживания	-	Экспоненциальное
Среднее время обслуживания	ед. вр.	1

Структура модели

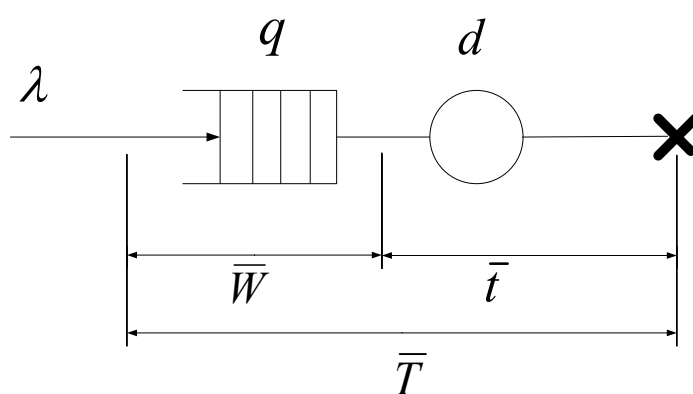


Рисунок 1 – Структура модели однофазной СМО (M/M/1, M/D/1)

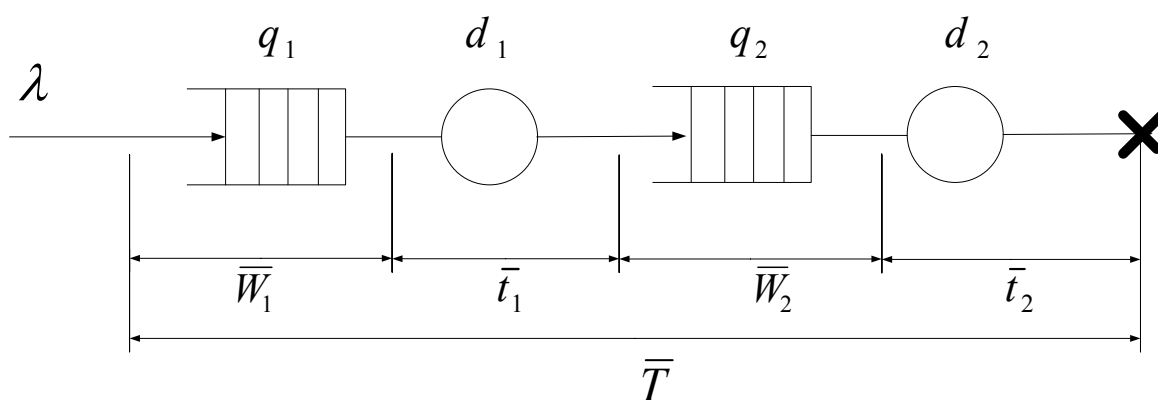


Рисунок 2 – Структура модели двухфазной СМО (M/D/1)

1 Построение имитационной модели СМО М/М/1

Имитационная модель включает в себя источник заявок (source), элемент очереди (queue), одно обслуживающее устройство, имитируемое элементом задержки (delay) и элемент завершения обслуженных заявок (sink). Также модель включает в себя элемент сбора статистики построения гистограммы (data) и элемент отображения гистограммы (Histogramm). Структура модели, построенной в AnyLogic, приведена на рисунке 2.

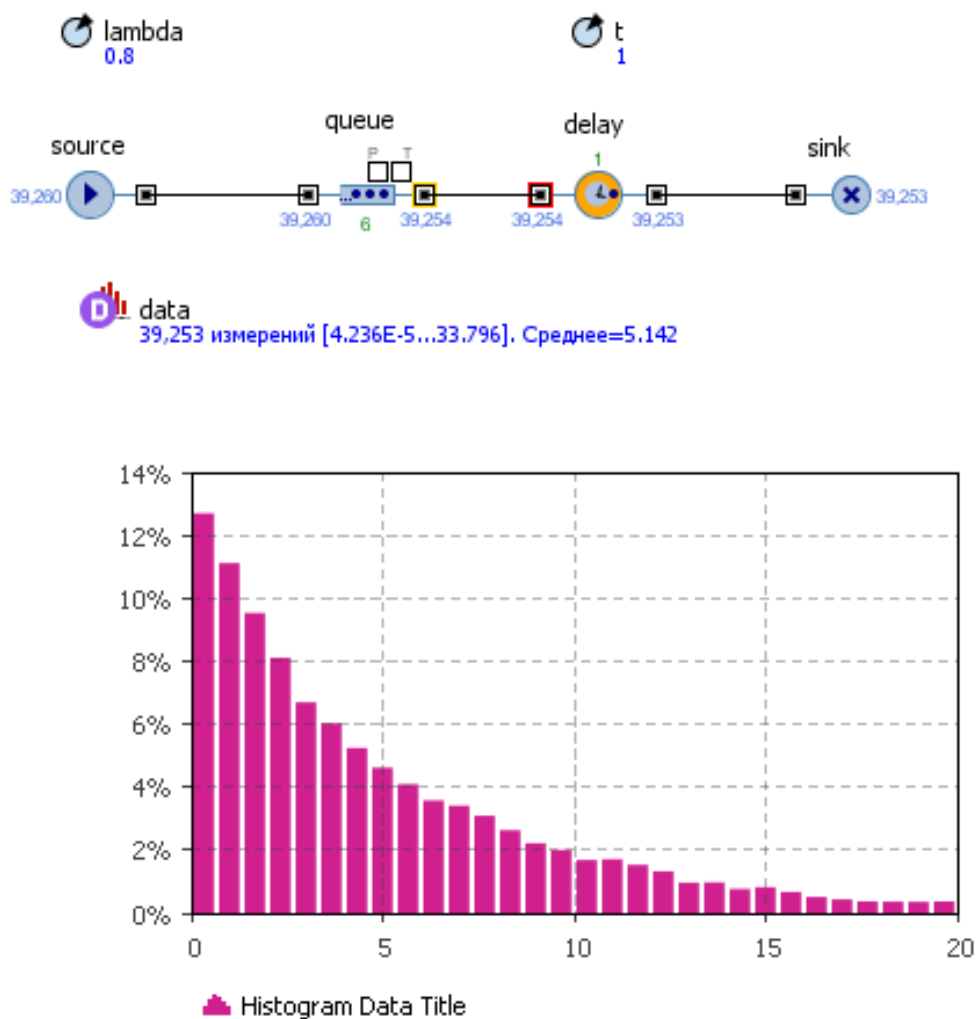


Рисунок 2 – Имитационная модель М/М/1, М/Д/1

На рисунке 2 приведена структура имитационной модели двухфазной СМО и гистограммы времени ожидания на первой и второй фазах обслуживания при интенсивности нагрузки 0,8.

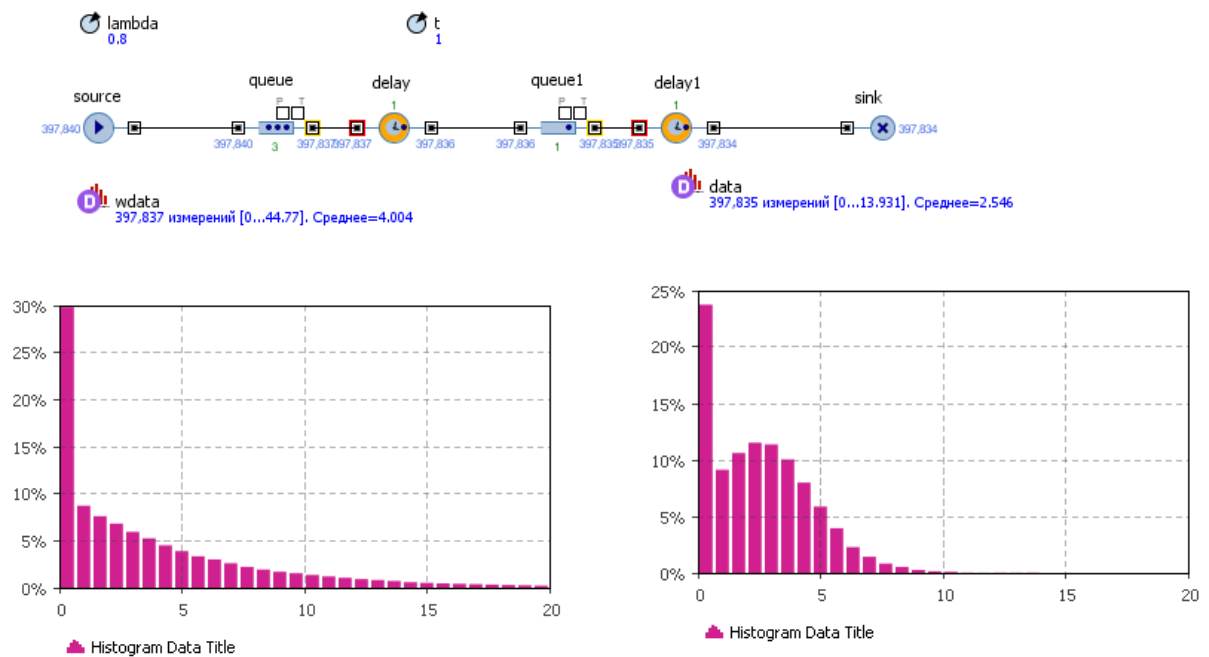


Рисунок 2 – Имитационная модель двухфазной СМО

2 Проведение имитационных экспериментов

(результаты имитационного моделирования)

Интенсивность нагрузки, определяется как

$$y = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \bar{t} \quad \text{Эрл} \quad (1)$$

где λ - интенсивность заявок (заявок/с),

\bar{t} - средняя продолжительность обслуживания заявки.

Результаты имитационного моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования

Интенсивность нагрузки, Эрл	Измеренные параметры					
	M/M/1		M/D/1		2фазы	
	W	T	W	T	W1	W2
0,1	0,112	1,113	0,055	1,055	0,155	0,216
0,2	0,249	1,250	0,124	1,124	0,276	0,388
0,3	0,424	1,423	0,214	1,214	0,492	0,646
0,4	0,679	1,678	0,333	1,333	0,640	0,860
0,5	0,997	1,996	0,500	1,500	0,951	1,120
0,6	1,500	2,499	0,741	1,741	1,595	1,514
0,7	2,352	3,352	1,161	2,161	2,312	1,940
0,8	3,970	4,972	2,015	3,015	4,004	2,546
0,9	9,018	10,017	4,479	5,479	10,929	3,820

1,0	18,578	19,580	8,623	9,623	14,334	4,548
-----	--------	--------	-------	-------	--------	-------

3 Вычисления параметров (аналитическая модель)

Аналитическая модель для оценки задержки СМО M/G/1

$$\bar{W} = \frac{\bar{t}}{1-\rho} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\bar{t}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Аналитическая модель для оценки задержки СМО M/M/1

$$\bar{W} = \frac{\bar{t}}{1-\rho} \quad (2)$$

Аналитическая модель для оценки задержки СМО M/D/1

$$\bar{W} = \frac{\bar{t}}{2(1-\rho)} \quad (3)$$

$$\bar{T} = \bar{W} + \bar{t} \quad (4)$$

Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты расчета*

Интенсивность нагрузки, Эрл	Измеренные параметры					
	M/M/1		M/D/1		2фазы	
	\bar{W}	\bar{T}	\bar{W}	\bar{T}	\bar{W}	\bar{T}
0,1						
0,2						
0,3						
0,4						
0,5						
0,6						
0,7						
0,8						
0,9						
1,0						

*Требуется заполнить таблицу согласно результатам расчета

4 Анализ полученных результатов

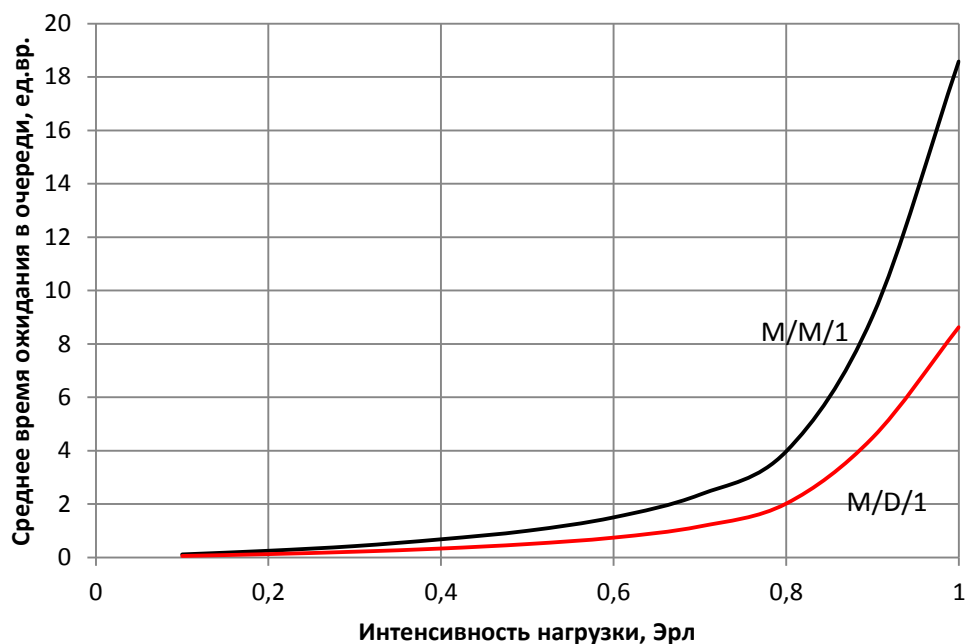


Рисунок 3 – Зависимость времени ожидания от интенсивности нагрузки для моделей M/M/1, M/D/1 (по результатам имитационного моделирования)

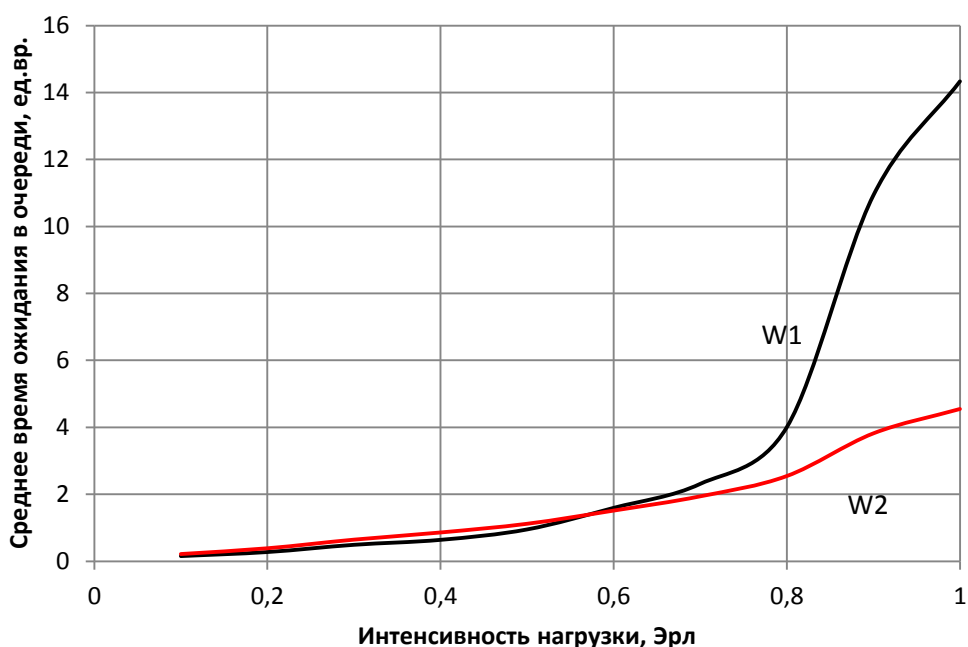


Рисунок 3 – Зависимость времени ожидания от интенсивности нагрузки на первой и второй фазах обслуживания двухфазной СМО (M/M/1)

Выводы

1. Результаты оценки задержки на ожидание с помощью имитационного моделирования близки к результатам оценки с помощью аналитической модели (формула Полячека-Хинчина). Максимальная ошибка составила 0,1%.

2. С ростом интенсивности трафика время ожидания в очереди также увеличивается. При интенсивности нагрузки больше или равной единице, время ожидания стремится к бесконечности, что в имитационной модели сопровождается ростом объема занимаемой памяти и может привести к зависанию системы моделирования.

3. Время ожидания в системе M/D/1 вдвое меньше, чем в системе M/M/1, что следует из формулы Полячека-Хинчина и подтверждается результатами имитационного моделирования. Чем меньше дисперсия времени обслуживания, тем меньше время ожидания в очереди.

4. Результаты имитационного моделирования двухфазной СМО показали, что функционирование первой фазы обслуживания может быть описано соответствующей моделью СМО, в то время как функционирование второй фазы может существенно отличаться от аналитической модели. Это объясняется зависимостью моментов поступления заявок на вход второй фазы обслуживания от процесса обслуживания заявок на первой фазе.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Варианты заданий на лабораторную работу №3

Таблица П.1.1 - Параметры модели

№ Варианта	Параметры модели		
	Количество узлов в сети, шт.	Номер узла, удаления пакета.	Задержка в линии, с
1	7	3	0,10
2	6	4	0,20
3	8	5	0,15
4	9	4	0,05
5	9	5	0,20
6	10	7	0,18
7	5	3	0,12
8	7	6	0,30
9	9	8	0,10
10	6	4	0,20
11	6	7	0,15
12	5	3	0,05
13	5	4	0,20
14	6	3	0,18
15	6	4	0,12
16	5	5	0,30
17	6	4	0,10
18	7	6	0,20
19	8	4	0,15
20	7	3	0,05
21	7	6	0,20
22	7	4	0,18
23	10	8	0,12
24	7	3	0,30
25	7	4	0,05
26	7	2	0,20
27	10	5	0,18
28	9	6	0,12
29	10	4	0,30
30	6	2	0,12

Пример оформления лабораторной работы №3

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №3
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Моделирование в OMNeT++

(пример отчета по лабораторной работе №3)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Характеристики и параметры СМО

Параметр	Ед.изм.	Значение
Количество узлов в сети	шт.	11
Номер узла удаления пакета	-	5
Задержка в линии	с	0,1
Структура сети	-	Произвольная полносвязная, связность узлов от 1 до 5.

Структура модели.

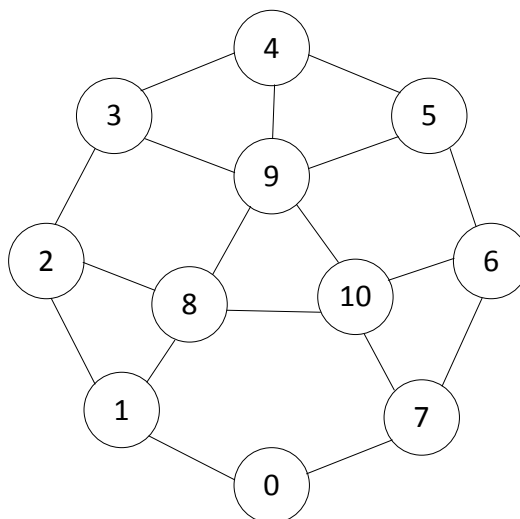


Рисунок 1 – Структура имитационной модели

1. Построение имитационной модели

Имитационная модель включает в себя один тип узла: «tic». Все узлы создаются на основе этого типа. На этапе инициализации узел «0» создает сообщение и отправляет узлам на случайный выход, т.е. к узлам 1 или 7. Далее узлы «1» или «7» пересылают принятые сообщения в случайных направлениях и так процесс повторяется, пока сообщение не достигнет узла с заданным номером (номер 5). При приеме сообщения этим узлом, Ю оно удаляется и процесс моделирования завершается.

Структура модели, построенной в OMNeT++, приведена на рисунке 2.

Файл txc10.cc

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <omnetpp.h>

class Txc10 : public cSimpleModule
{
protected:
    virtual void forwardMessage(cMessage *msg);
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);
};

Define_Module(Txc10);

void Txc10::initialize()
{
    if (getIndex()==0)
    {
        // Если номер узла 0, то создать сообщение.
        char msgname[20];
        sprintf(msgname, "tic-%d", getIndex());
        cMessage *msg = new cMessage(msgname);
        scheduleAt(0.0, msg); //Отправить сообщение
    }
}

void Txc10::handleMessage(cMessage *msg)
{
    if (getIndex()==5) //Если номер узла 5, то удалить сообщение
    {
        // Обработка поступившего сообщения.
        EV << "Message " << msg << " arrived.\n";
        delete msg;
    }
    else
    {
        // Иначе переслать сообщение далее.
        forwardMessage(msg);
    }
}

void Txc10::forwardMessage(cMessage *msg)
{

```

```

// Пересылка сообщения.
// На случайный порт `out[]`.
int n = gateSize("out");
int k = intuniform(0,n-1);

EV << "Forwarding message " << msg << " on port out[" << k << "]\n";
send(msg, "out", k);
}

```

Файл tictoc10.ned

```

//
// This file is part of an OMNeT++/OMNEST simulation example.
// Copyright (C) 2003-2008 Andras Varga
//
// This file is distributed WITHOUT ANY WARRANTY. See the file
// `license' for details on this and other legal matters.
//
simple Txc10
{
  parameters:
    @display("i=block/routing");
  gates:
    input in[]; // declare in[] and out[] to be vector gates
    output out[];
}
network Tictoc10
{
  submodules:
    tic[11]: Txc10;
  connections:
    tic[0].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[1].in++;
    tic[0].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[1].out++;
    tic[1].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[2].in++;
    tic[1].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[2].out++;
    tic[1].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[8].in++;
    tic[1].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[8].out++;
    tic[2].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[3].in++;
    tic[2].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[3].out++;
    tic[2].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[8].in++;
    tic[2].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[8].out++;
    tic[3].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[4].in++;
    tic[3].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[4].out++;
    tic[3].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[9].in++;
    tic[3].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[9].out++;
}

```

```
tic[4].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[5].in++;
tic[4].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[5].out++;
tic[4].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[9].in++;
tic[4].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[9].out++;
tic[5].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[6].in++;
tic[5].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[6].out++;
tic[5].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[9].in++;
tic[5].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[9].out++;
tic[6].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[7].in++;
tic[6].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[7].out++;
tic[6].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[10].in++;
tic[6].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[10].out++;
tic[7].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[0].in++;
tic[7].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[0].out++;
tic[7].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[10].in++;
tic[7].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[10].out++;
tic[8].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[9].in++;
tic[8].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[9].out++;
tic[9].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[10].in++;
tic[9].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[10].out++;
tic[10].out++ --> { delay = 100ms; } --> tic[8].in++;
tic[10].in++ <-- { delay = 100ms; } <-- tic[8].out++;
}
```

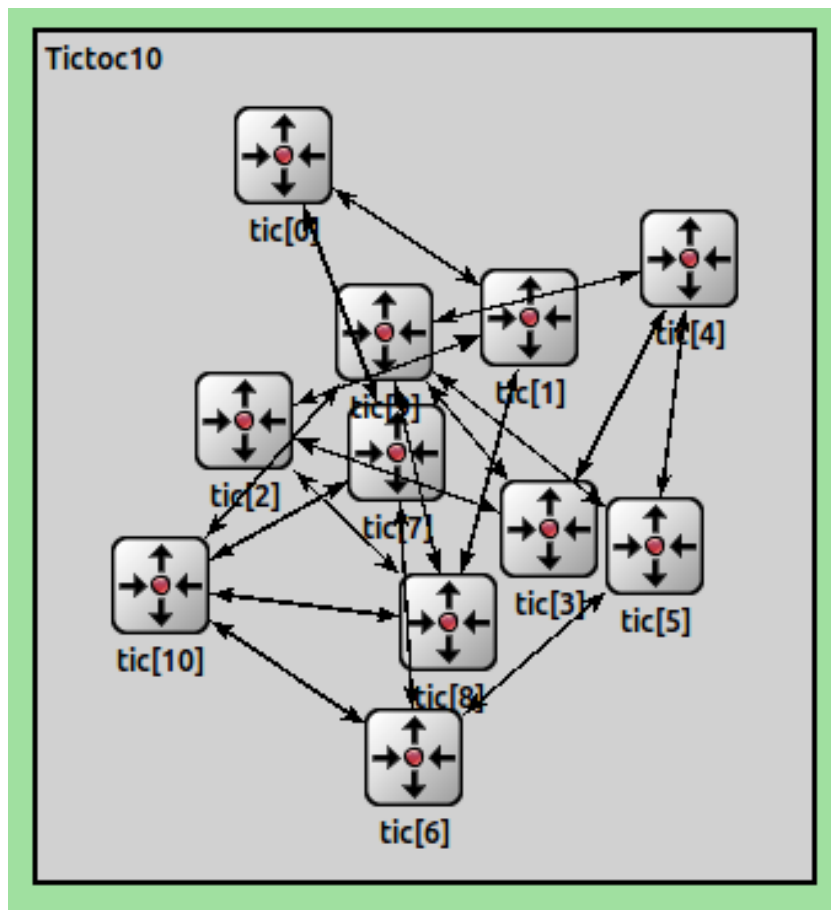



Рисунок 2 – Имитационная модель (структура сети)

На рисунке 2 приведена структура имитационной модели сети из 11 узлов, структура которой эквивалентна рис.1.

2 Выполнение имитационного эксперимента

(результаты имитационного моделирования)

На рис.3 приведены результаты выполнения имитационного эксперимента.

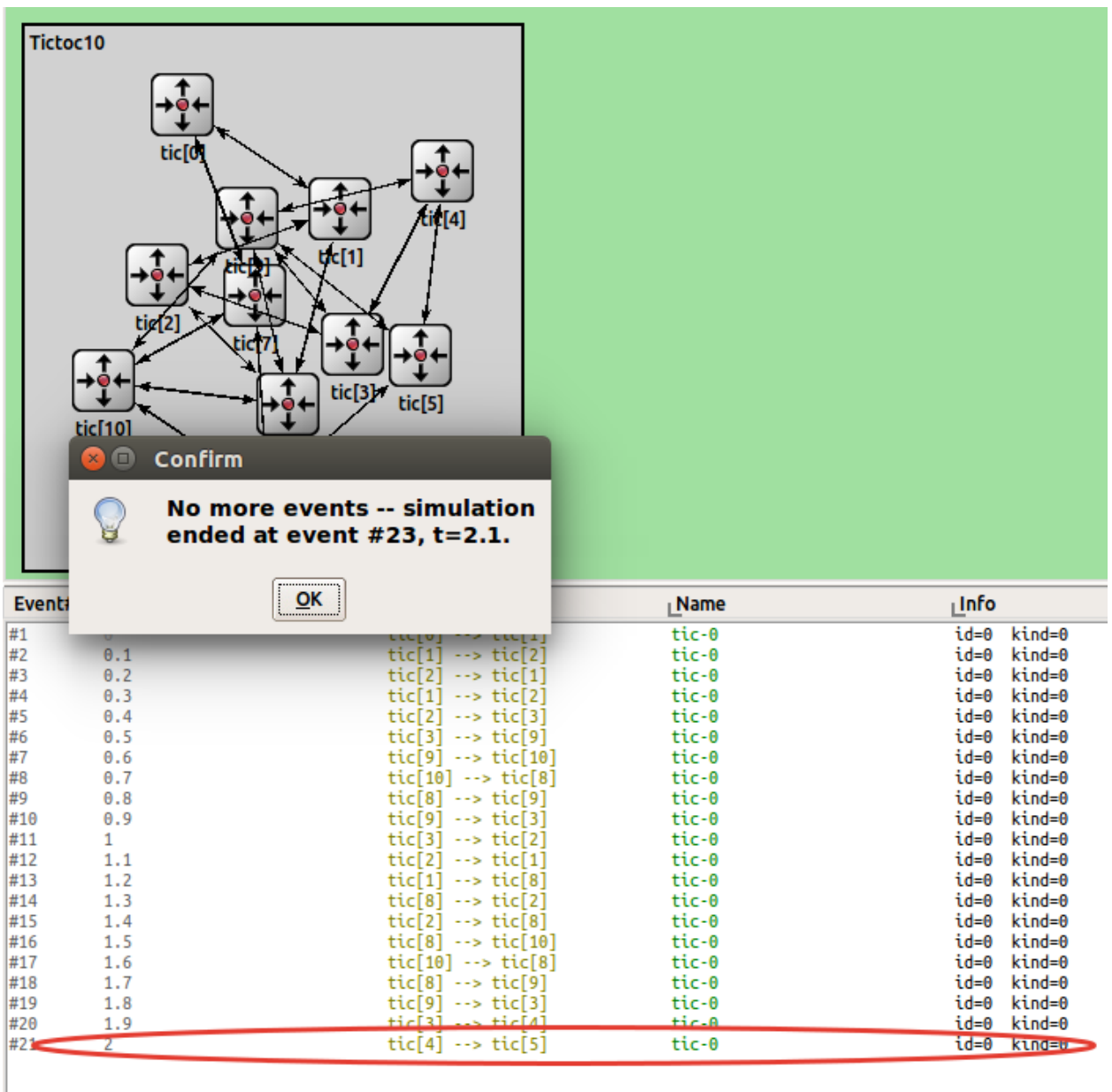


Рисунок 3 – Имитационная модель (структура сети)

Имитационная модель завершает работу, когда сообщение поступает в узел с номером 5, что видно из лог-листинга, приведенного на рис.3.

Маршрут, пройденный сообщением:

0, 1, 2, 3, 9, 10, 8, 9, 3, 2, 1, 8, 2, 8, 10, 8, 9, 3, 4, 5.

Выводы

1. Для построения имитационной модели сети была разработана модель простого модуля на языке C++. Для построения моделей всех узлов сети используется один и тот же простой модуль.

2. Функционирование простого модуля определяется условиями, которые учитывают его место в структуре сети. Если номер модуля равен 0, то он является генератором сообщения, если его номер равен заданному в задании (в данном случае 5), то он является конечным узлом маршрута.

3. Выбор маршрута для доставки сообщения производится случайным образом, при приеме сообщения узлом он вырабатывает случайное число, на основе которого выбирает порт назначения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Варианты заданий на лабораторную работу №4

Тип СМО М/М/1/к

Диапазон изменения входящей нагрузки: от 0,333 до 2,5 Эрл.

Длительность прогона модели: 1000 с (модельного времени).

Таблица П.1.1 - Параметры модели

№ Варианта	Параметры модели		
	Количество фаз обслуж., шт.	Длина буфера.	Среднее время обслуживания, с
1	2	2	0,10
2	3	2	0,15
3	4	2	0,20
4	5	2	0,25
5	2	5	0,10
6	3	5	0,15
7	4	5	0,20
8	5	5	0,25
9	2	10	0,10
10	3	10	0,15
11	4	10	0,20
12	5	10	0,25
13	2	15	0,10
14	3	15	0,15
15	4	15	0,20
16	5	15	0,25
17	2	20	0,10
18	3	20	0,15
19	4	20	0,20
20	5	20	0,25
21	2	2	0,10
22	3	2	0,15
23	4	2	0,20
24	5	2	0,25
25	2	5	0,10
26	3	5	0,15
27	4	5	0,20
28	5	5	0,25
29	2	7	0,30
30	3	7	0,35

Пример оформления лабораторной работы №4

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №4
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Построение модели СМО в OMNeT++

(пример отчета по лабораторной работе №4)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Характеристики и параметры СМО (модели СМО)

Параметр	Ед.изм.	Значение
Тип СМО	-	M/M/1/k
Количество фаз обслуживания	шт.	2
Среднее время обслуживания	с	0,1
Максимальная длина очереди k	Заявок	10
Диапазон значений входящей нагрузки при исследовании	Эрл	от 0,333 до 2,5
Продолжительность имитации (прогона)	с	1000

Структура модели.

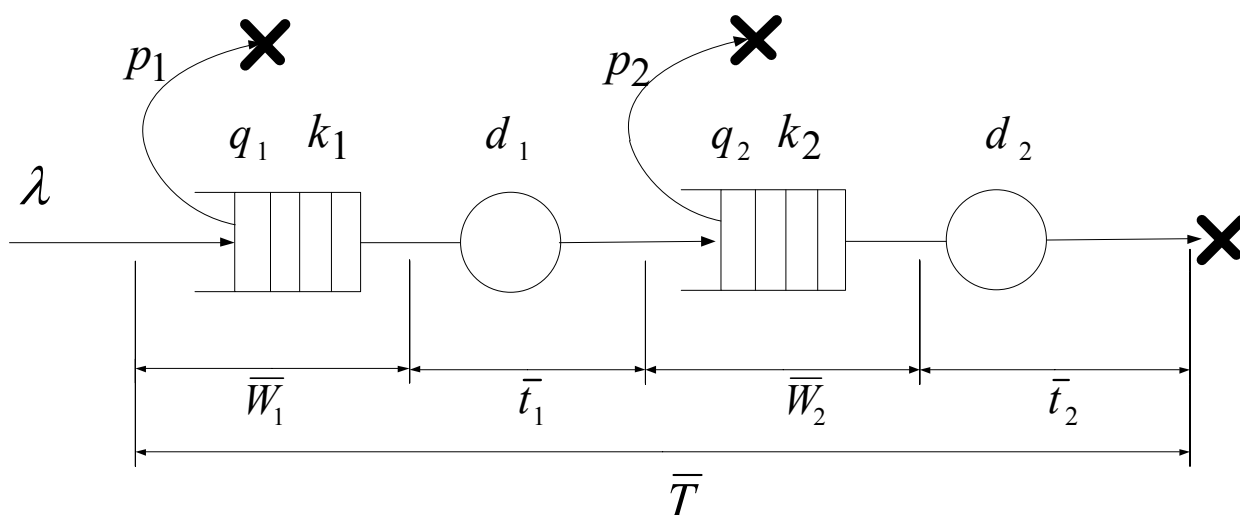


Рисунок 1 – Структура имитационной модели

1 Построение имитационной модели

Имитационная модель включает в себя четыре элемента: источник заявок (source), две очереди (буфера) с обслуживающими устройствами (server и server1) и один элемент завершения заявок (sink). Источник заявок создает последовательность заявок, которые поступают на вход первого элемента с очередью (server) где могут быть обслужены сразу или после ожидания в очереди, в случае занятости всех k мест ожидания заявка теряется. После выхода из элемента server (после обслуживания на первой фазе) заявка поступает на аналогичный элемент server1 (вторую фазу), которая функционирует аналогичной первой фазе обслуживания. Если заявка

прошла обслуживание на второй фазе, то она считается обслуженной (доставленной) и уничтожается элементом sink.

Структура модели, построенной в OMNeT++, приведена на рисунке 2.

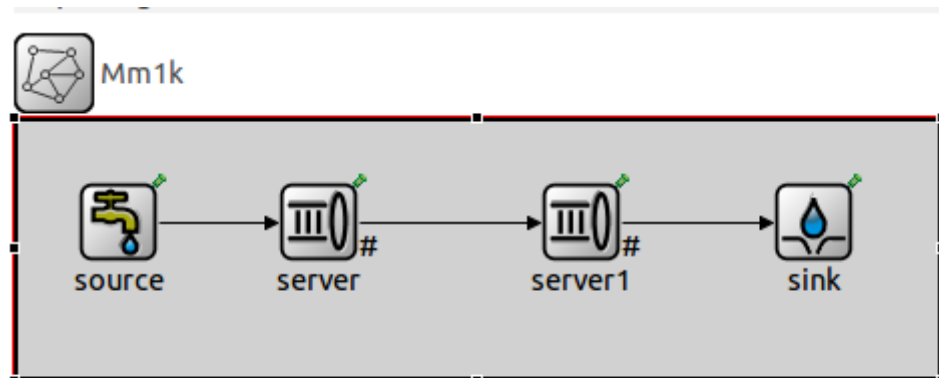


Рисунок 2 – Имитационная модель (структураСМО)

Содержимое файлов модели приведено ниже.

Файл Mm1k.ned

```
package mm1k;
import ned.IdealChannel;
import org.omnetpp.queueing.Source;
import org.omnetpp.queueing.Queue;
import org.omnetpp.queueing.Sink;
import org.omnetpp.queueing.PassiveQueue;
import org.omnetpp.queueing.Server;
import org.omnetpp.queueing.Delay;
//
// TODO Generated network
//
network Mm1k
{
    @display("bgb=459,127");
    submodules:
        source: Source {
            @display("p=50,50");
        }
        server: Queue {
            @display("p=150,50");
        }
        sink: Sink {
            @display("p=397,50");
        }
}
```

```

server1: Queue {
    @display("p=281,50");
}
connections:
source.out --> server.in++;
server.out --> server1.in++;
server1.out --> IdealChannel --> sink.in++;
}

```

Файл omnetpp.ini

[General]

network = Mm1k

**.result-recording-modes = default, histogram

*.source.interArrivalTime = exponential(0.1s)

*.server.serviceTime = exponential(0.1s)

*.server1.serviceTime = exponential(0.1s)

*.server.capacity = 10

*.server1.capacity = 10

На рисунке 3 приведена иллюстрация процесса выполнения имитационного эксперимента.

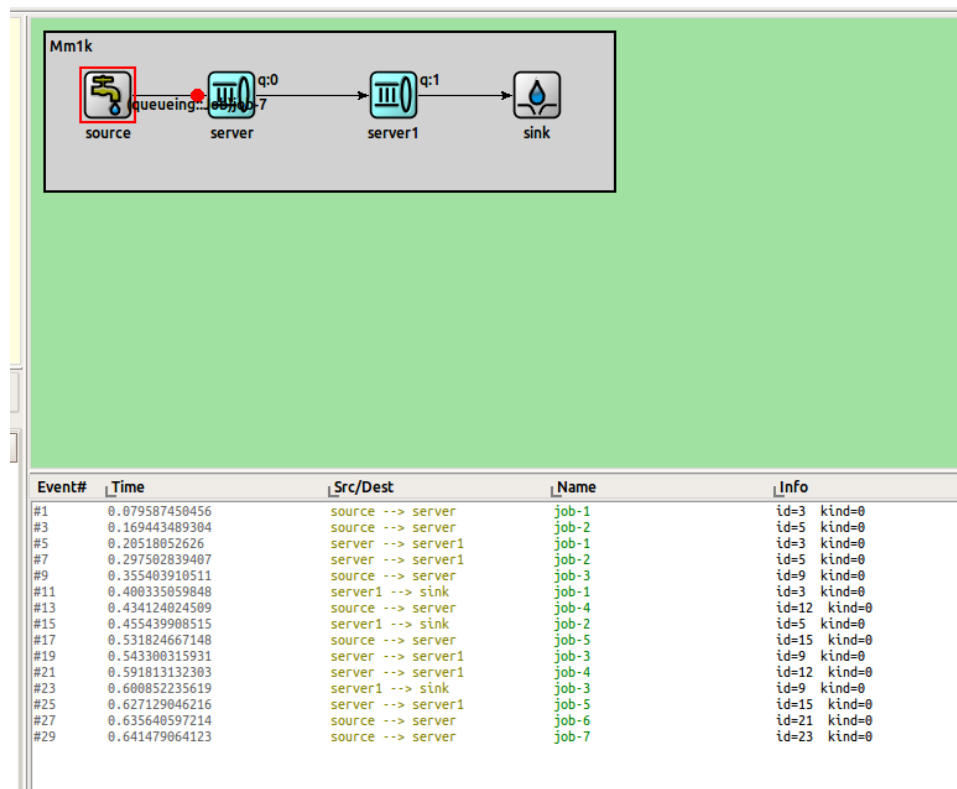


Рисунок 3 – Имитационная модель (выполнение имитации)

2 Выполнение имитационно эксперимента (результаты имитационного моделирования)

Приведенные ниже результаты получены при интенсивности входящей нагрузки равной

$$y = \bar{\lambda} \bar{t} = \frac{1}{\bar{a}} \bar{t} \text{ Эрл} \quad (1)$$

где \bar{a} - среднее значение интервала времени между заявками (с),
 \bar{t} - среднее значение времени обслуживания заявки (с),
 $\bar{\lambda}$ - среднее значение интенсивности заявок (заявок/с),

На рис.4 приведены значения времени доставки в ходе эксперимента, т.е. времени прохождения заявки от выхода элемента source до входа в элемент sink.

Приведенные ниже графики получены при интенсивности заявок равной 10 заявок/с, и среднем времени обслуживания 0,1 с. Интенсивность входящей нагрузки, согласно (1), равна 1 Эрл.

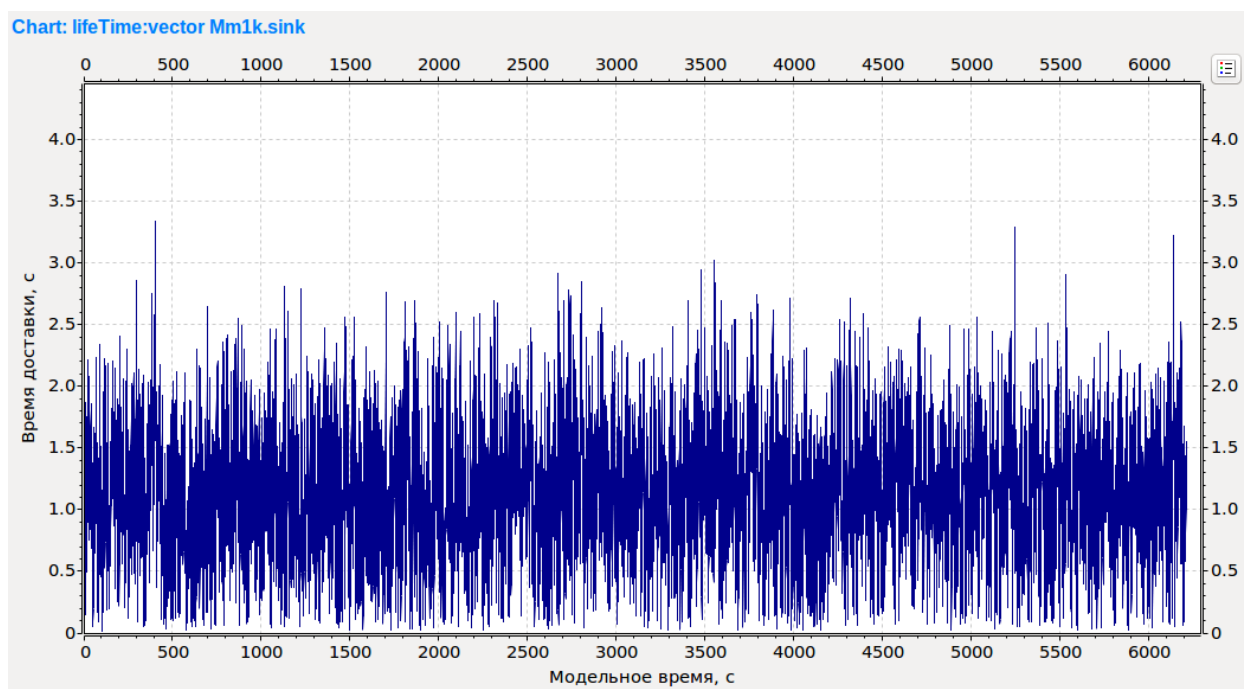


Рисунок 4 –Значения времени доставки в ходе эксперимента

На рис.5 приведено распределение времени ожидания в очереди элемента server .

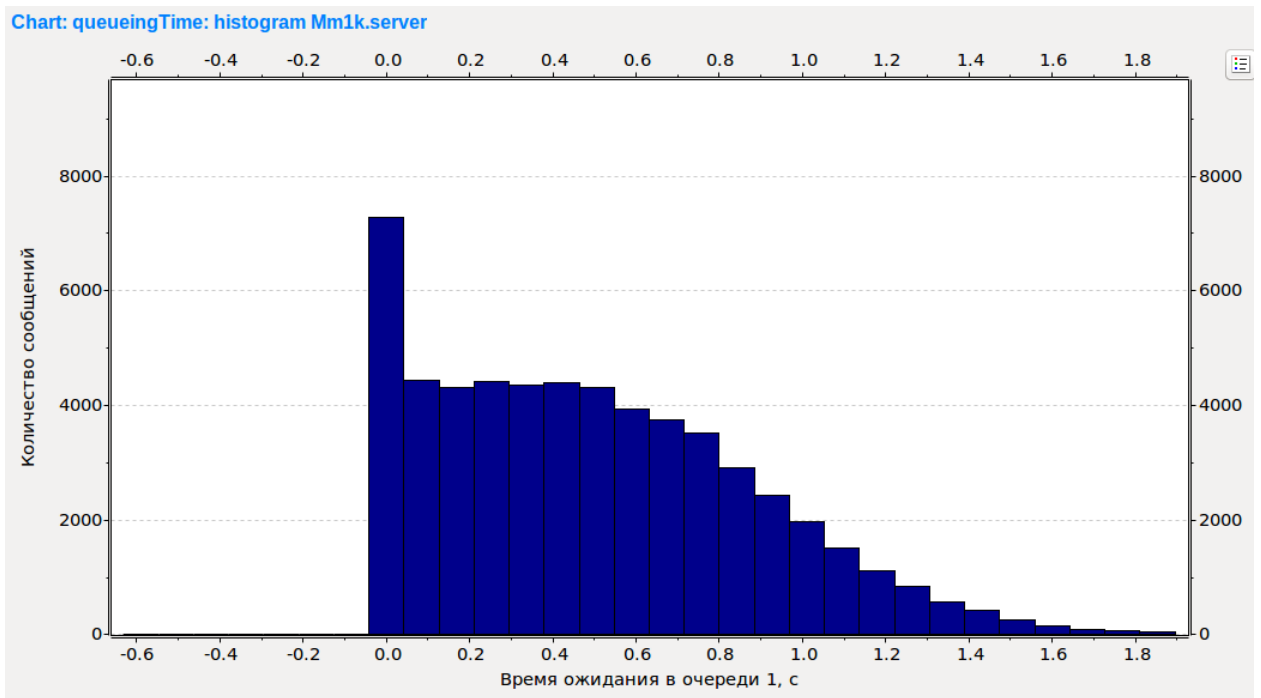


Рисунок 5 – Распределение времени ожидания в очереди 1 (среднее значение 0,49 с)

На рис.6 приведено распределение времени ожидания в очереди элемента server1.

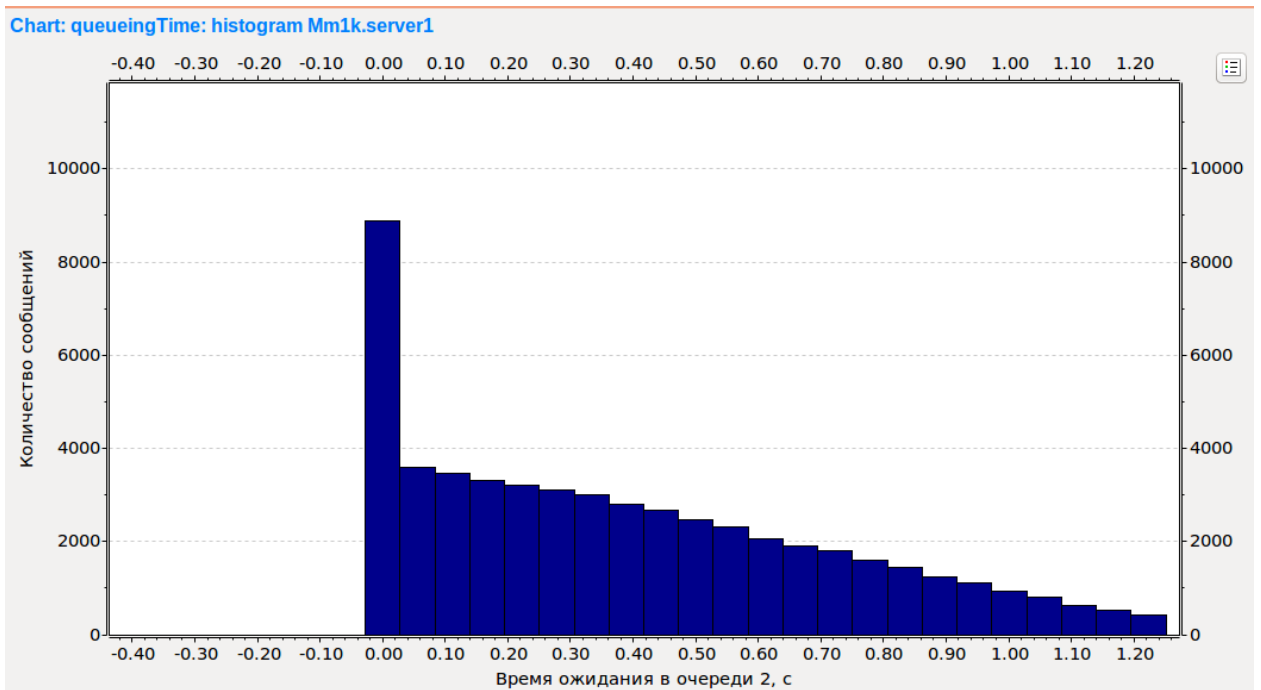


Рисунок 3 – Распределение времени ожидания в очереди 2 (среднее значение 0,40 с)

На рис.7 приведено распределение времени доставки.

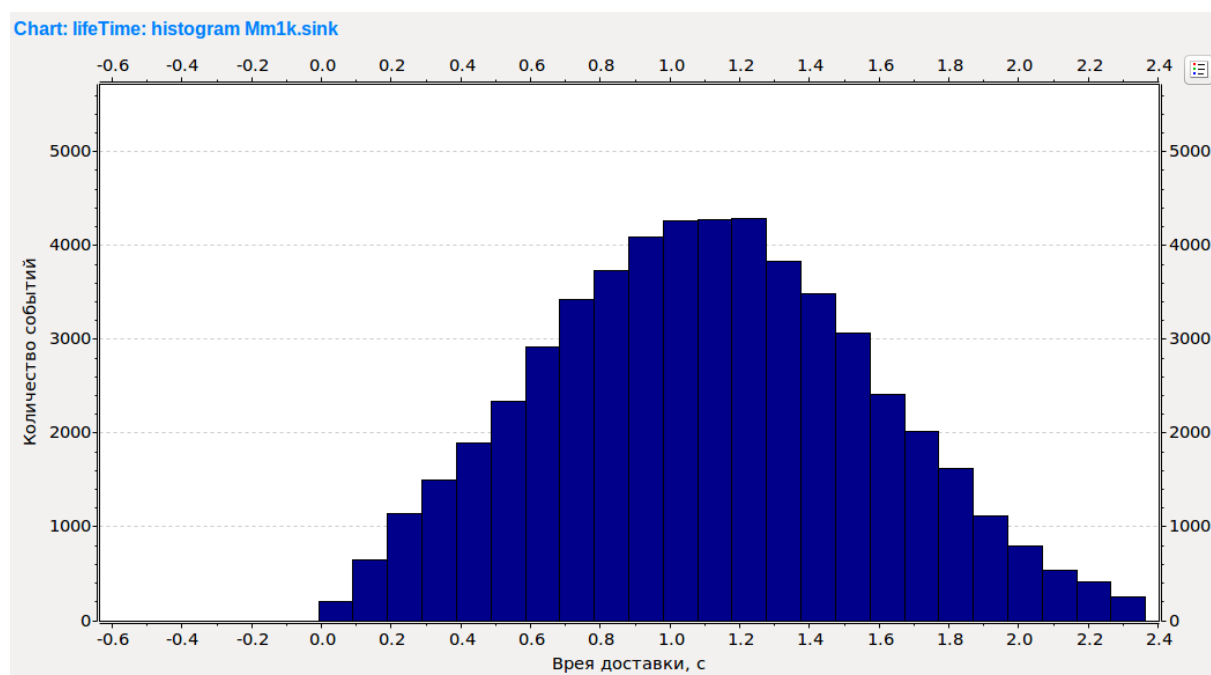


Рисунок 7 – Распределение времени доставки (среднее значение 1,09 с)

В таблице 1 приведены результаты имитационных экспериментов, выполненных для исследования зависимости вероятности потерь от интенсивности входящей нагрузки.

Таблица 1 – Оценка зависимости потерь от нагрузки

Интенсивность нагрузки	Общее количество сообщ.	Потеряно на фазе 1	Потеряно на фазе 2	Доля потерь на фазе 2	Доля потерь на фазе 2	Общая доля потерь
0,333	3351	0	0	0,000	0,000	0,00
0,364	3639	0	0	0,000	0,000	0,00
0,400	4149	0	0	0,000	0,000	0,00
0,444	4431	0	0	0,000	0,000	0,00
0,500	5047	0	2	0,000	0,000	0,00
0,571	5660	4	2	0,001	0,000	0,00
0,667	6592	25	17	0,004	0,003	0,01
0,800	8064	187	91	0,023	0,011	0,03
1,000	10101	811	431	0,080	0,043	0,12
1,250	12726	2742	780	0,215	0,061	0,28
1,667	16573	6499	836	0,392	0,050	0,44
2,500	24924	14913	738	0,598	0,030	0,63
5,000	49661	39449	1001	0,794	0,020	0,81

На рисунке 8 приведена зависимость вероятности потерь от интенсивности входящей нагрузки (общей и для различных фаз обслуживания).

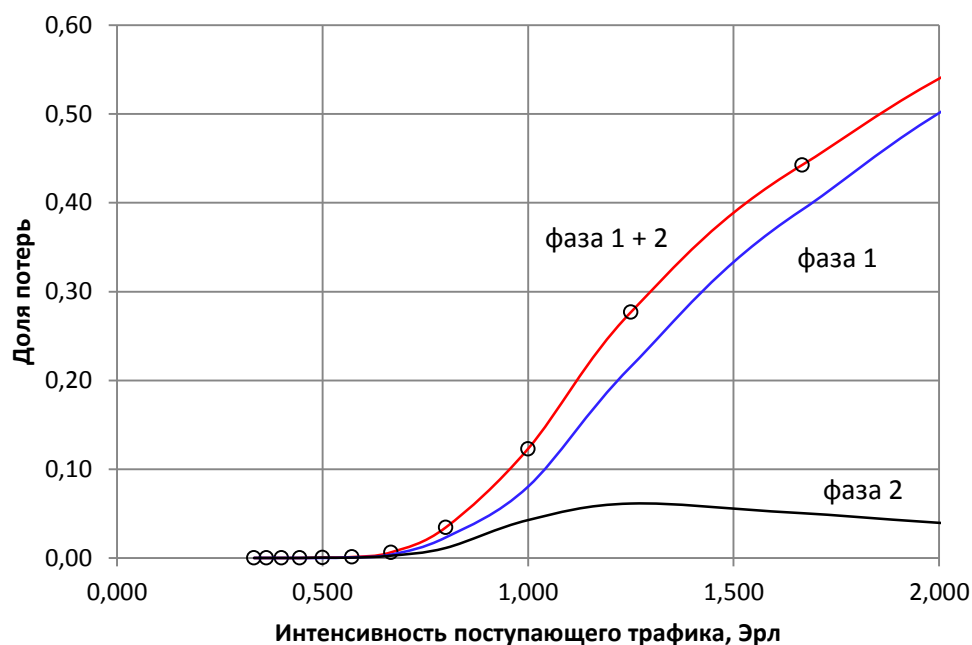


Рисунок 8 –Зависимость вероятности потерь от интенсивности нагрузки

3 Выводы

1. Время доставки сообщения от источника до элемента sink, в исследуемой СМО, является случайной величиной. Можно выделить две составляющие этого времени: это время обслуживания на каждой из фаз СМО и время ожидания начала обслуживания, также на каждой из фаз СМО.

2. Получены эмпирические функции распределения времени ожидания на первой и второй фазах обслуживания, а также функция распределения времени доставки. Эмпирическая плотность вероятности времени доставки близка к плотности вероятности распределения Эрланга с параметром 2.

3. Исследование вероятности потерь показало, что она возрастает с ростом интенсивности входящей нагрузки. Вероятность потерь в СМО определяется вероятностями потерь на первой или второй фазах обслуживания. Большую долю вероятности потерь составляет вероятность потерь на первой фазе обслуживания.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

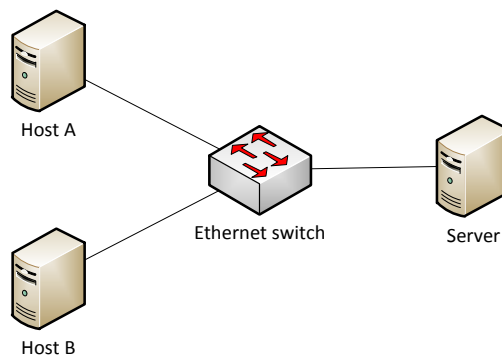
Варианты заданий на лабораторную работу №5

Таблица П.1.1 - Параметры модели

№ Варианта	Параметры модели			
	Максимальное использование пропускной способности при измерении временных параметров	Полезная нагрузка кадра, байт uniform(A, B)		Пропускная способность линии, Мбит/с
		A	B	
1	0,5	50	200	10
2	0,6	50	500	10
3	0,7	50	1000	10
4	0,8	70	1400	10
5	0,9	100	200	100
6	0,5	100	500	100
7	0,6	100	1000	100
8	0,7	100	1400	100
9	0,8	200	400	10
10	0,9	200	500	10
11	0,5	200	1000	10
12	0,6	200	1400	10
13	0,7	300	400	100
14	0,8	300	500	100
15	0,9	300	1000	100
16	0,5	300	1400	100
17	0,6	400	600	10
18	0,7	400	800	10
19	0,8	400	1000	10
20	0,9	400	1400	10
21	0,5	500	600	100
22	0,6	500	800	100
23	0,7	500	1000	100
24	0,8	500	1400	100
25	0,9	600	700	10
26	0,5	600	800	10
27	0,6	600	1000	10
28	0,7	600	1400	10
29	0,8	70	800	100
30	0,9	100	900	100

Структура сети:

1. Моделируемая сеть состоит из двух хостов, сервера и коммутатора.
2. Хосты производят трафик с одинаковыми параметрами.
3. Функционирование. Хост отправляет запрос серверу, сервер отправляет ответ на полученный запрос соответствующему хосту.
4. Время моделирования 180 с.



Характеристики трафика:

1. Полагаем, что размер полезной нагрузки кадра случаен и подчинен равномерному закону распределения.
2. Полагаем, что кадры передаются через случайные интервалы времени, имеющие экспоненциальное распределения.

Пример оформления лабораторной работы №5

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №5
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Построение модели сети Ethernet в OMNeT++

(пример отчета по лабораторной работе №5)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Параметры исследуемой сети, согласно варианту задания

Параметр	Ед.изм.	Значение
Количество хостов в сети	шт.	2
Количество серверов в сети	шт.	1
Размер полезной нагрузки	Байт	50...1400
Макс. использования линии	-	0,8
Скорость ПД линии связи	Мбит/с	10
Продолжительность эксперимента	С	180

Структура модели согласно варианту задания.

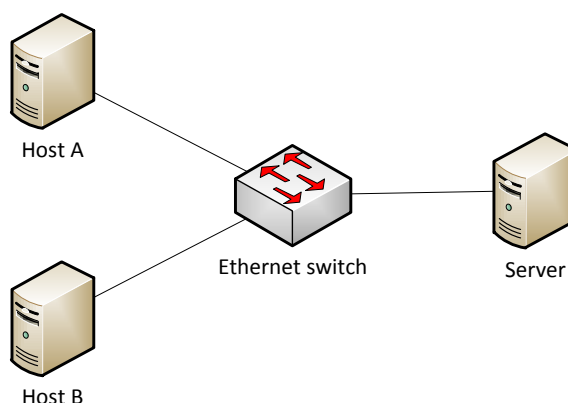


Рисунок 1 – Структура исследуемой сети

1 Построение имитационной модели

Имитационная модель включает в себя четыре элемента: два хоста hostA, hostB, сервер и коммутатор etherSwitch. Хосты соединены между собой через коммутатор. Каждый из хостов подключен к коммутатору линией Ethernet с заданной скоростью передачи данных (10 Мбит/с).

Структура модели, построенной в OMNeT++, приведена на рисунке 2.

Хоты hostA и hostB формируют запросы и отправляют их серверу. Запрос представляет собой кадр, размер полезной нагрузки в котором случаен и лежит в диапазоне значений от 50 до 1400 байт (согласно заданию). Длина полезной нагрузки кадра распределена согласно равномерному закону (согласно заданию). Кадры запросов отправляются через случайные интервалы времени, продолжительность интервалов имеет экспоненциальное распределение (согласно заданию).

В ответ на запрос сервер отправляет кадр, размер которого определяется аналогичными правилами. Полагаем, что ответы на запросы имеют те же характеристики, что и сами запросы.

Оценим интенсивность производимого хостом трафика:

$$\bar{a} = \frac{\bar{L}}{\bar{\tau}} \text{ бит/с} \quad (1)$$

где \bar{L} – средняя длина кадра (бит),

$\bar{\tau}$ – средняя длина интервала времени между отправками кадров (с).

При равномерном законе распределения длины полезной нагрузки в кадре, средняя длина кадра будет равна

$$\bar{L} = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2} = \frac{P_{\min} + P_{\max} + 2H}{2} \text{ бит} \quad (2)$$

где L_{\min} и L_{\max} – минимальная и максимальная длины кадров (согласно заданию) (бит),

P_{\min} и P_{\max} – минимальный и максимальный размер полезной нагрузки в кадре (бит),

H – длина заголовка (бит).

Примем длину заголовка кадра равной 29 байт = 232 бит.

Тогда согласно заданию, средняя длина кадра равна

$$\bar{L} = \frac{8(50 + 1400) + 2 \cdot 232}{2} = 6032 \text{ бит}$$

Согласно заданию, максимальное использование пропускной способности линии составляет $\rho = 0,8$.

$$\rho = \frac{\bar{a}}{b}$$

где b – пропускная способность линии связи (согласно заданию $b = 10$ Мбит/с)

$$\bar{a} = b\rho = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ Мбит/с.}$$

Максимальная нагрузка имеет место на участке Ethernet switch – Server. Этот участок пропускает трафик обоих хостов: Host A и Host B. Интенсивность трафика, производимого обоими хостами равна, следовательно интенсивность трафика каждого из хостов должна быть равна:

$$\bar{a}_{Host} = \frac{\bar{a}}{2} = 4 \text{ Мбит/с.}$$

Тогда средняя величина интервала между кадрами

$$\bar{\tau} = \frac{\bar{L}}{\bar{a}_{Host}} = \frac{6032}{4} = 0,00151 \text{ с}$$

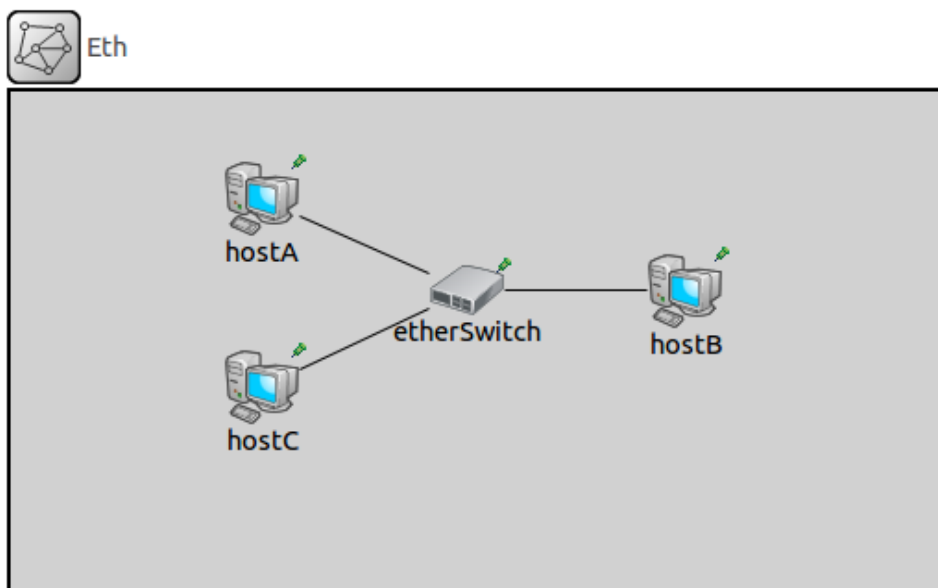


Рисунок 2 – Имитационная модель (структура СМО)

Содержимое файлов модели приведено ниже.

Файл «ned»

```

package lesson_02;
import inet.node.ethernet.Eth10M;
import inet.node.ethernet.EtherHost;
import inet.node.ethernet.EtherSwitch;

// TODO documentation
//
network Eth
{
    @display("bg=506,272");
    submodules:
        hostA: EtherHost {
            @display("p=119,66");
        }
        hostB: EtherHost {
            @display("p=377,131");
        }
        etherSwitch: EtherSwitch {
            @display("p=249,130");
        }
        hostC: EtherHost {
            @display("p=119,184");
        }
    connections:
        hostA.ethg <--> Eth10M <--> etherSwitch.ethg++;
        etherSwitch.ethg++ <--> Eth10M <--> hostB.ethg;

```

```

    hostC.ethg <--> Eth10M <--> etherSwitch.ethg++;
} Файл omnetpp.ini
[General]
network = lesson_02.Eth
sim-time-limit = 180s
tkenv-plugin-path = ../../etc/plugins
**.result-recording-modes = default #, histogram
**.vector-recording = true
**.hostA.cli.destAddress = "hostB"
**.hostC.cli.destAddress = "hostB"
**.queueType = "DropTailQueue"
**.mac.txQueueLimit = 1000
**.cli.sendInterval = exponential(0.00151s)
**.mac.address = "auto"
**.cli.reqLength = intuniform(50,1400)*1B
**.cli.respLength = intuniform(50,1400)*1B

```

На рисунке 3 приведена иллюстрация процесса выполнения имитационного эксперимента.

2 Выполнение имитационного эксперимента (результаты имитационного моделирования)

На рисунке 3 приведены результаты имитационного эксперимента, на основе которых можно судить о соответствии модели требуемым параметрам задания.

Browse Data

Here you can see all data that come from the files specified in the Inputs page.

All (71 / 533) Vectors (71 / 71) Scalars (12 / 444) Histograms (0 / 18)

General-0-20170409-16:06:07-2872 module filter bits/sec *

	Module	Name	Value
-16:06:07-2872	Eth.hostA.mac	bits/sec sent	3955651.754893
-16:06:07-2872	Eth.hostA.mac	bits/sec rcvd	3965251.5277615
-16:06:07-2872	Eth.server.mac	bits/sec sent	7904304.2244765
-16:06:07-2872	Eth.server.mac	bits/sec rcvd	7890527.3870774
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[0].mac	bits/sec sent	3965360.1943726
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[0].mac	bits/sec rcvd	3955651.754893
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[1].mac	bits/sec sent	7890527.3870774
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[1].mac	bits/sec rcvd	7904304.2244765
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[2].mac	bits/sec sent	3939061.8078214
-16:06:07-2872	Eth.etherSwitch.eth[2].mac	bits/sec rcvd	3935171.6764774
-16:06:07-2872	Eth.hostB.mac	bits/sec sent	3935171.6764774
-16:06:07-2872	Eth.hostB.mac	bits/sec rcvd	3939004.6078507

Рисунок 3 – Имитационная модель (структура СМО)

Согласно полученным результатам интенсивность трафика, производимого хостами составляет 3,956 Мбит/с и 3,935 Мбит/с (hostA и hostB, соответственно). Интенсивность трафика на участке Ethernet switch – Server составила 7,904 Мбит/с. Отклонение полученных значений от заданной величины составляет не превышает 1,5%. Это позволяет судить о соответствии модели требованиям задания.

На рис.4 приведены значения объема переданных данных принятым сервером в ходе эксперимента. На рисунке 5 приведены значения задержки доставки пакета в ходе эксперимента.

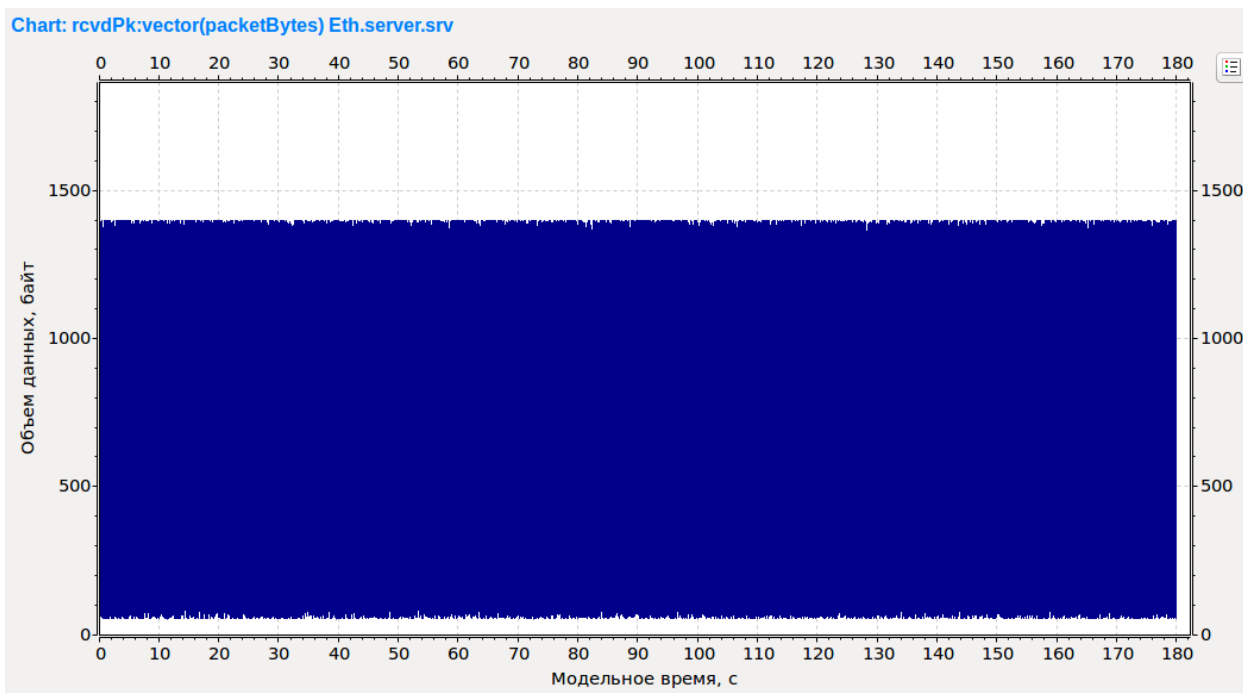


Рисунок 4 –Объем переданных данных (server)

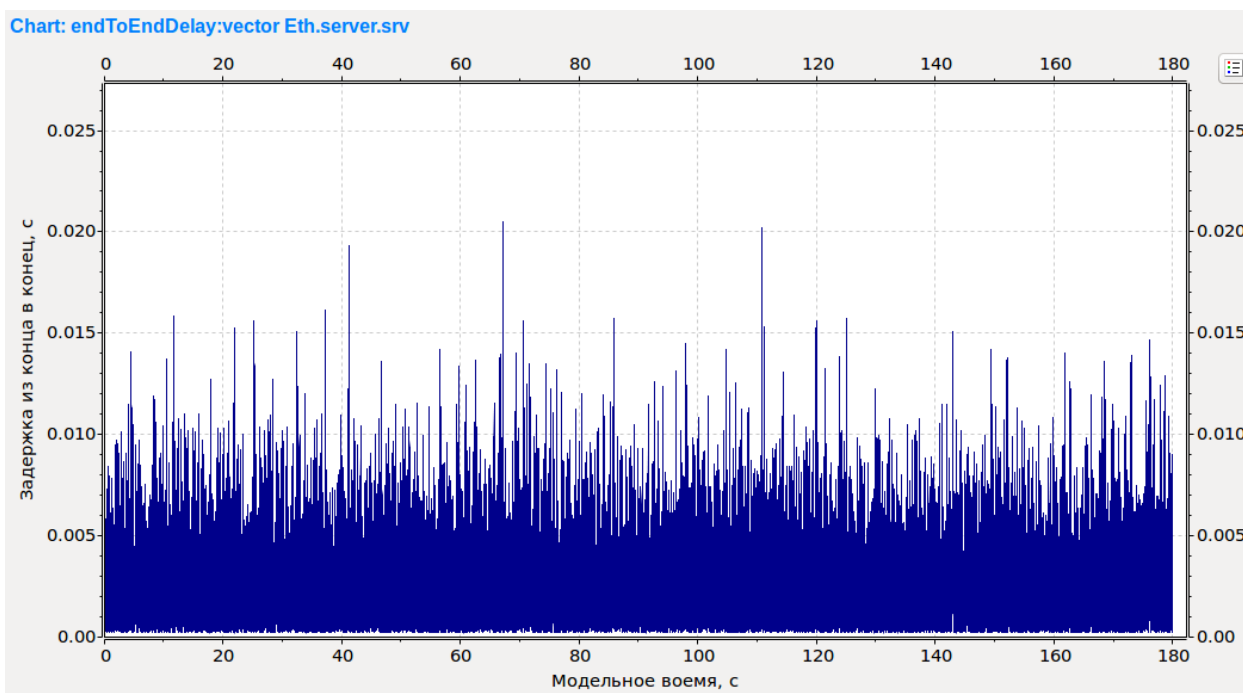


Рисунок 4 –Значения времени доставки в ходе эксперимента (server)

среднее значение 0,0030 с.

На рис.6 приведено распределение времени доставки пакета для узла hostA.

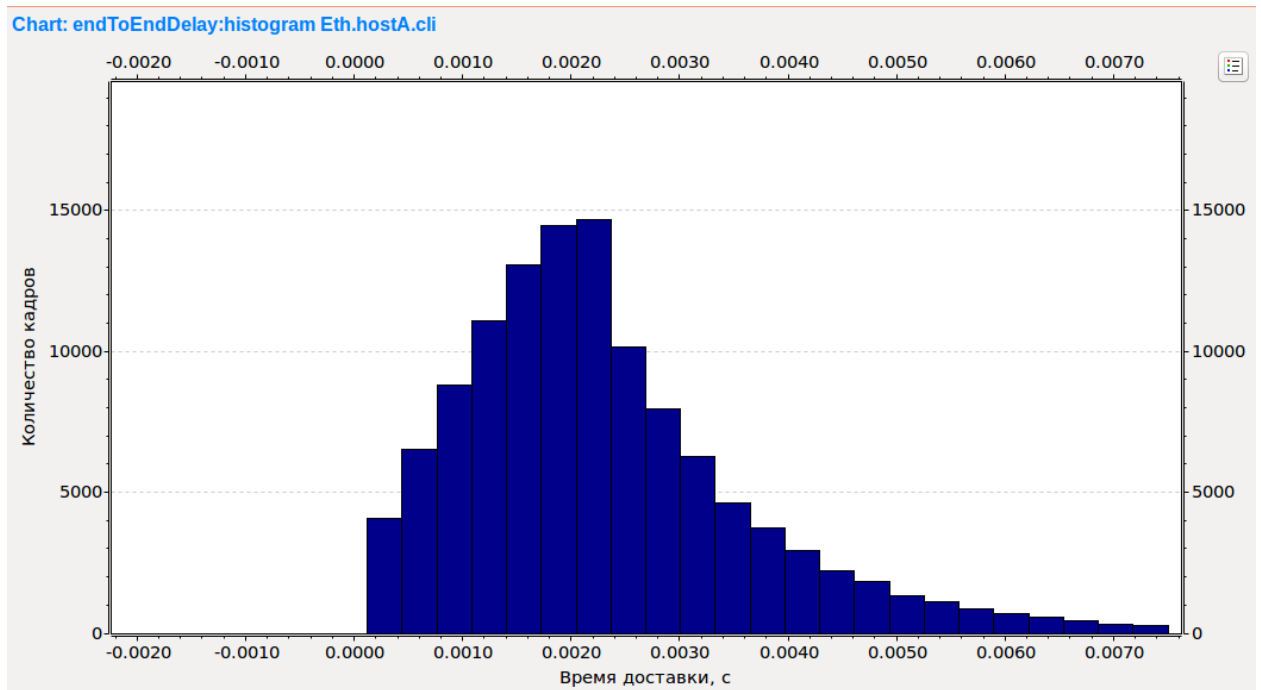


Рисунок 5 –Распределение времени из конца в конец host A

(среднее 0,0023 с)

На рис.6 приведено распределение времени доставки пакета для узла hostB.

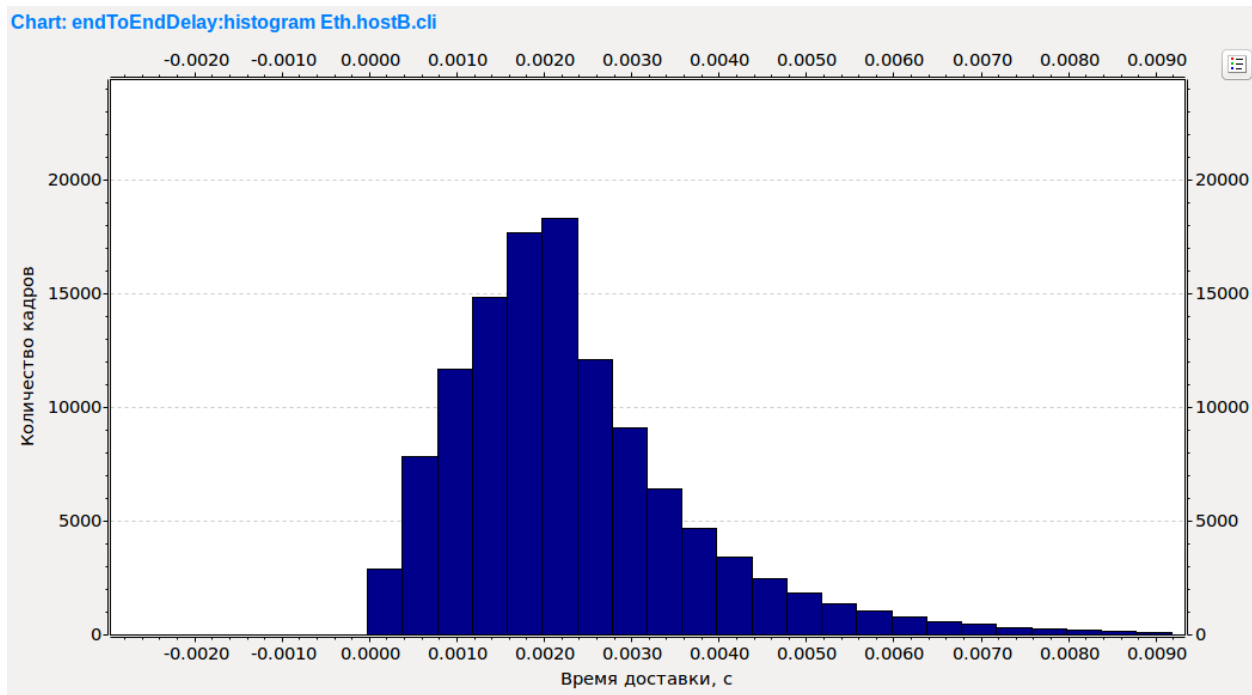


Рисунок 6 – Распределение времени из конца в конец host B
(среднее 0,0023 с)

На рис.7 приведено распределение времени доставки для сервера.

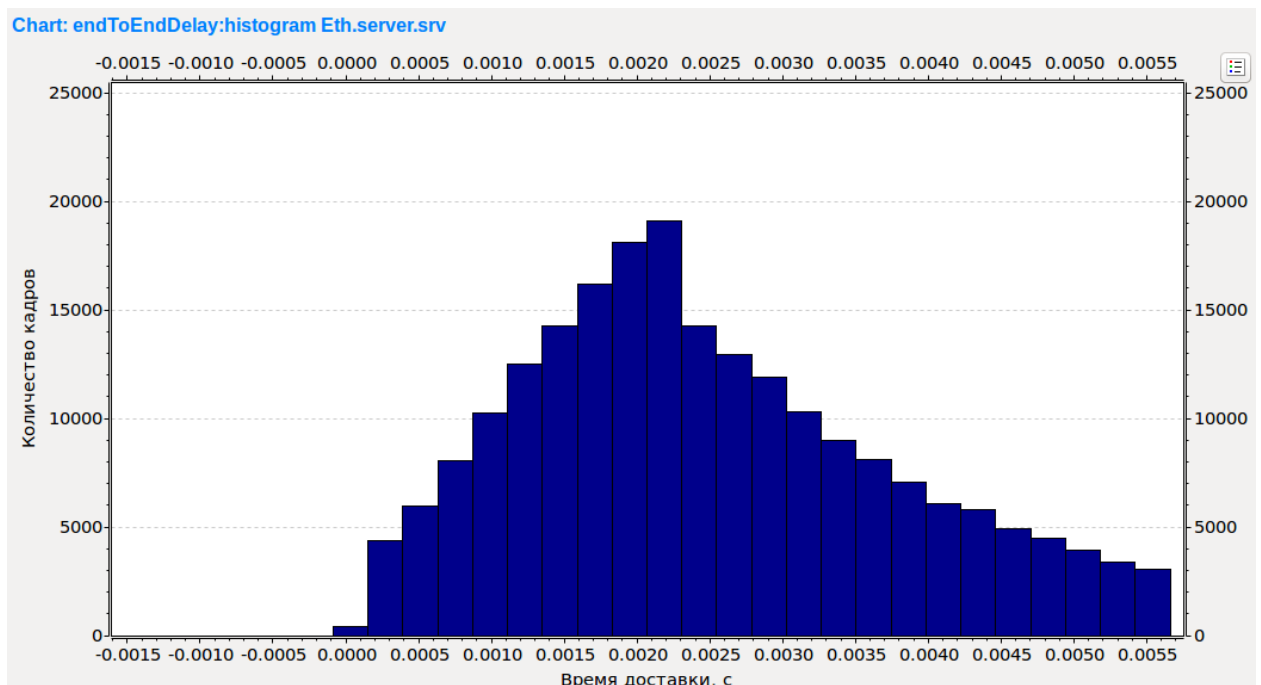


Рисунок 7 – Распределение времени из конца в конец server
(среднее 0,0030 с)

В таблице 1 приведены результаты имитационных экспериментов, выполненных для исследования зависимости задержки от интенсивности нагрузки.

Таблица 1 – Оценка зависимости задержки от нагрузки

ρ	a , Мбит/с	τ , с	T , с
0,10	0,5	0,01206	0,0013
0,50	2,5	0,00241	0,0016
0,60	3,0	0,00201	0,0017
0,70	3,5	0,00172	0,0019
0,80	4,0	0,00151	0,0025
0,90	4,5	0,00134	0,0039
0,96	4,8	0,00126	0,0097
0,98	4,9	0,00123	0,0210
1,00	5,0	0,00121	0,0238

На рисунке 8 приведена зависимость вероятности потерь от интенсивности входящей нагрузки (общей и для различных фаз обслуживания).

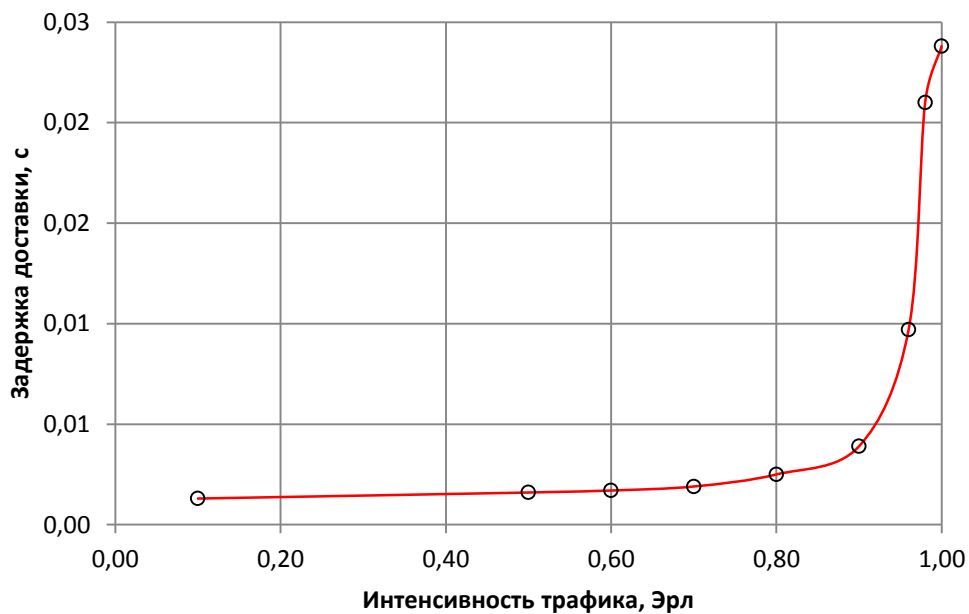


Рисунок 8 –Зависимость задержки от интенсивности нагрузки

3 Выводы

1. Результаты расчета параметров потока кадров позволили получить результаты близкие к ожидаемым. Параметры трафика, оцененные по результатам имитационного эксперимента, отличались от расчетных значений не более, чем на 1,5%.

2. Получены эмпирические распределения задержки доставки кадра, которые схожи для двух хостов, работающих в сходных условиях. Форма распределения времени доставки кадра для сервера отличается от формы распределений, полученных для хостов.

3. Увеличение интенсивности трафика приводит к увеличению времени доставки кадров. Относительно быстрый рост времени доставки происходит при увеличении интенсивности нагрузки более 0,8 Эрл.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

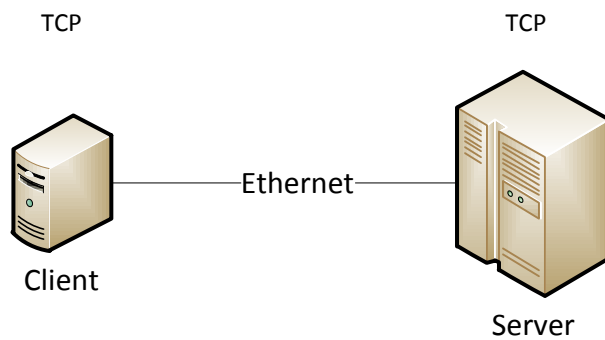
Варианты заданий на лабораторную работу №6

Таблица П.1.1 - Параметры модели

№ Варианта	Вероятность потерь в линии (PER)	Параметры модели	
		Размер передаваемого файла, Мбайт	Пропускная способность линии, Мбит/с
1	$7 \cdot 10^{-3}$	10	10
2	$5 \cdot 10^{-3}$	50	10
3	$3 \cdot 10^{-3}$	20	10
4	$8 \cdot 10^{-3}$	14	10
5	$9 \cdot 10^{-3}$	25	100
6	$6 \cdot 10^{-3}$	55	100
7	$4 \cdot 10^{-3}$	27	100
8	$8 \cdot 10^{-7}$	12	100
9	$1 \cdot 10^{-2}$	40	10
10	$2 \cdot 10^{-2}$	30	10
11	$1 \cdot 10^{-7}$	35	10
12	$3 \cdot 10^{-2}$	32	10
13	$1 \cdot 10^{-3}$	28	100
14	$2 \cdot 10^{-3}$	33	100
15	$7 \cdot 10^{-3}$	100	100
16	$5 \cdot 10^{-3}$	43	100
17	$3 \cdot 10^{-3}$	62	10
18	$8 \cdot 10^{-3}$	58	10
19	$9 \cdot 10^{-3}$	65	10
20	$6 \cdot 10^{-3}$	34	10
21	$4 \cdot 10^{-3}$	60	100
22	$8 \cdot 10^{-7}$	80	100
23	$1 \cdot 10^{-2}$	18	100
24	$2 \cdot 10^{-2}$	14	100
25	$1 \cdot 10^{-7}$	17	10
26	$3 \cdot 10^{-2}$	8	10
27	$1 \cdot 10^{-3}$	12	10
28	$2 \cdot 10^{-3}$	44	10
29	$7 \cdot 10^{-3}$	80	100
30	$5 \cdot 10^{-3}$	90	100

Структура сети:

1. Моделируемая сеть состоит из клиента и сервера.
2. Функционирование. Клиент инициирует сессию и отправляет файл серверу, сервер поддерживает TCP соединение до окончания передачи файла или истечения установленного времени имитации.
3. Время моделирования 300 с.



Пример оформления лабораторной работы №6

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №6
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Исследование протокола TCP в OMNeT++

(пример отчета по лабораторной работе №6)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Параметры исследуемой сети, согласно варианту задания

Параметр	Ед.изм.	Значение
Скорость ПД линии связи	Мбит/с	10
Продолжительность эксперимента	С	300
Вероятность потерь в линии (PER)		$1 \cdot 10^{-7}$

Структура модели согласно варианту задания.

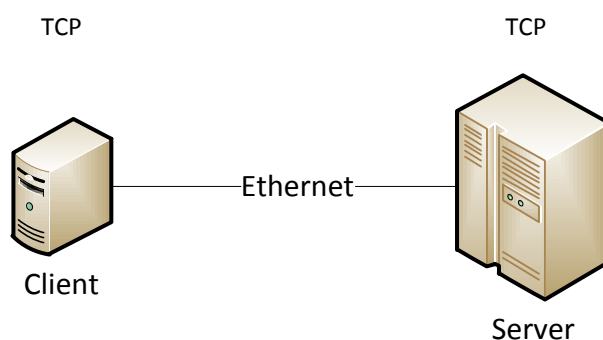


Рисунок 1 – Структура исследуемой сети

1 Построение имитационной модели

Для анализа функционирования TCP реализуем следующую модель. Создадим новую модель, дадим ей имя «WindowSize». В свойствах модели Меню->Properties подключим ссылку («Project References») на фреймворк INET. Далее создадим файл описания модели «NED» в папке WindowSize/simulations с названием «WindowSize». При создании файла укажем «NED file with one item». В палитре выберем модуль Network и добавим его в область редактора, откроем свойства добавленного модуля и переименуем его на «ClientServer». Выберем удобный размер отображения модуля «ClientServer», выберем из палитры тип submodule «standardHost» и разместим два таких submodule в поле модуля сети. Изменим имя одного из них на «client1», второго на «server». Выберем submodule «server», откроем контекстное меню и выберем свойства «Properties..» в свойствах выберем другое изображение «Image» для отображения модуля «device/server».

Далее выберем в палитре submodule «IPv4NetworkConfigurator» и разместим его в окне модели. Выберем в палитре тип соединения «DatarateChannel (ned)» кликнем по submodule «client», а затем по submodule «server», выберем в открывшемся контекстном меню «client.pppg++ <--> server.pppg++(PPPFrame-conn)», рисунок 1.

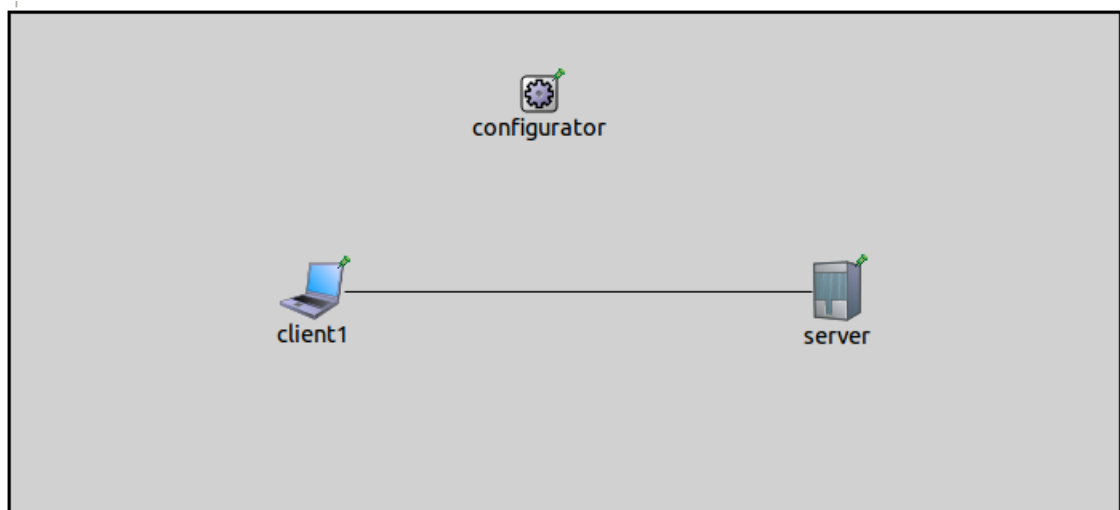


Рисунок 1 - Структура сети

Выберем соединительную линию, откроем контекстное меню (правая клавиша мыши), откроем форму параметров «Parameters...» изменим значения параметров «datarate» на 10Mbps и «delay» на 0.1us.

Далее выберем (или создадим) файл инициализации «ini». Откроем файл в редакторе, введем имя конфигурации «WindowSize», «Simulation time limit» введем значение 100s. Перейдем в текстовый режим редактирования «ini» файла, выбав вкладку «Source» и введем (или скопируем) следующие параметры.

```
[General]
description = "default_TCP <---> default_TCP"
network = ClientServer
total-stack = 7MiB
tkenv-plugin-path = ../../etc/plugins
record-eventlog = true
**.server.numPcapRecorders = 1
**.server.pcapRecorder[0].pcapFile = "server.pcap"
**.client.numPcapRecorders = 1
**.client.pcapRecorder[0].pcapFile = "client.pcap"

## tcp apps
**.numTcpApps = 1
**.client*.tcpApp[*].typename = "TCPSessionApp"
**.client*.tcpApp[0].active = true
**.client*.tcpApp[0].localPort = -1
**.client*.tcpApp[0].connectAddress = "server"
**.client*.tcpApp[0].connectPort = 1000
**.client*.tcpApp[0].tOpen = 0.2s
**.client*.tcpApp[0].tSend = 0.4s
**.client*.tcpApp[0].sendBytes = 5000000B
**.client*.tcpApp[0].sendScript = ""
**.client*.tcpApp[0].tClose = 25s

**.server*.tcpApp[*].typename = "TCPEchoApp"
```

```

**server*.tcpApp[0].localPort = 1000
**server*.tcpApp[0].echoFactor = 0
**server*.tcpApp[0].echoDelay = 0

# NIC configuration
**.ppp[*].queueType = "DropTailQueue" # in routers
**.ppp[*].queue.frameCapacity = 10 # in routers

*.configurator.config=xml("<config><interface hosts='*' address='192.168.1.x'
netmask='255.255.255.0'/></config>")

```

После ввода «NED» и «ini» файла можно запустить имитационный эксперимент, рисунок 2.

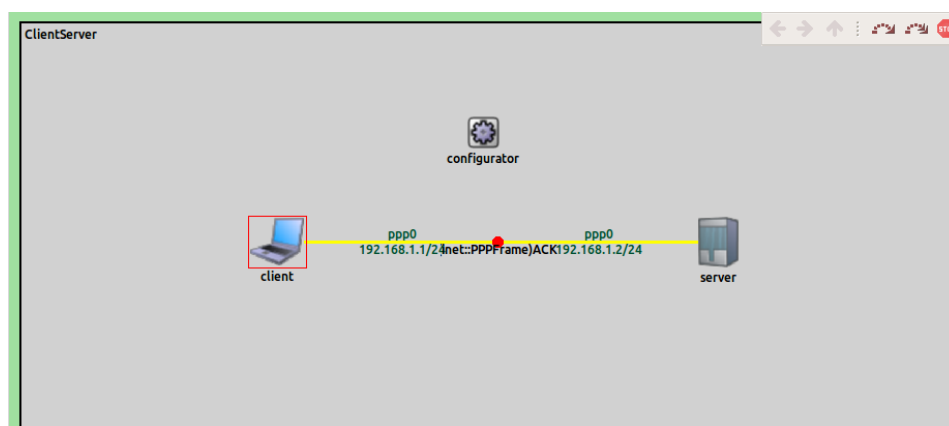


Рисунок 2 - Анимация в процессе имитационного эксперимента

В результате проведения эксперимента формируются файлы статистики, а также файлы «client.pcap» и «server.pcap», которые содержат подробные записи обо всех пакетах (сегментах) пересылаемых между клиентом и сервером. Эти файлы могут быть открыты программой «Wireshark». На рисунке 3 приведен пример отображения в Wireshark данных об обмене данными между клиентом и сервером во время проведения имитационного эксперимента. В таблице по каждому из сегментов отображаются номер пакета, время (модельное время), IP адреса источник и получателя, протокол, длина и дополнительная информация. При выборе пакета из списка о нем может быть получена подробная информация о содержимом заголовка и тела пакета.

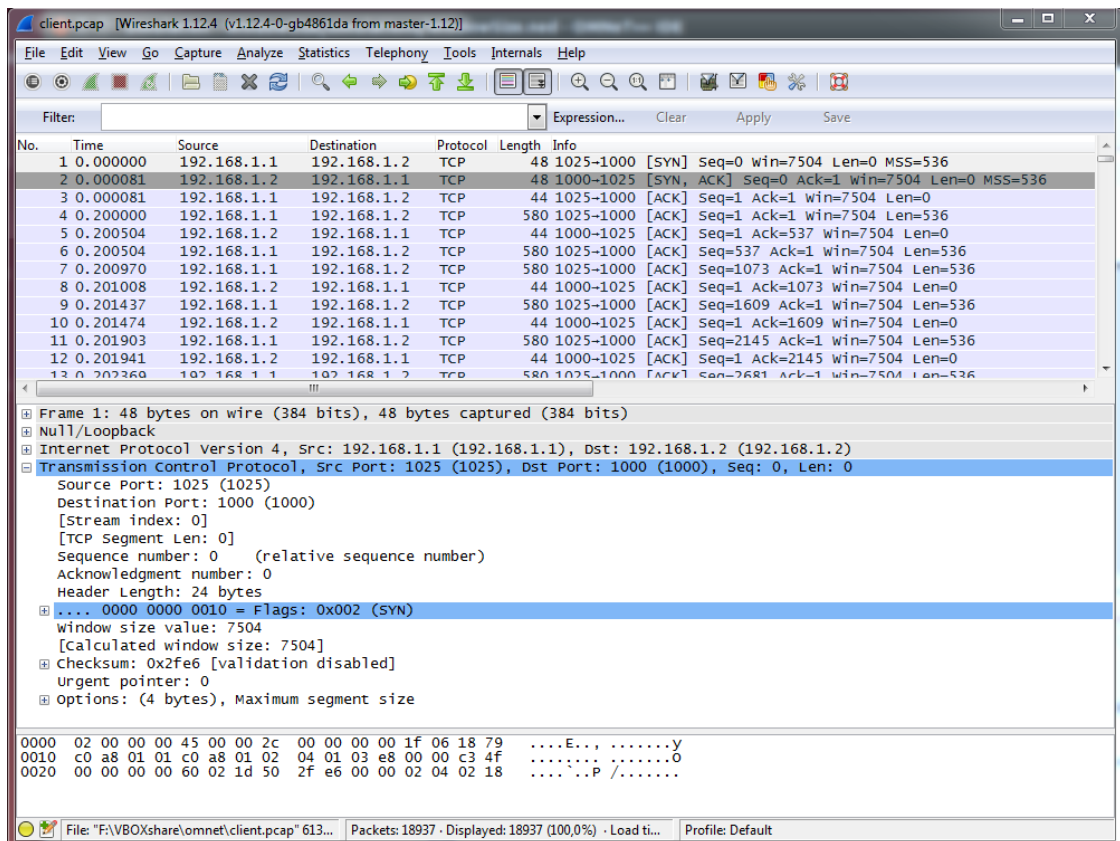


Рисунок 3 - Анализ потока в Wireshark

Эти данные позволяют провести детальный анализ обмена пакетами на протяжении всего TCP соединения. Например, рассматривая записи в начале списка можно увидеть сообщение от клиента к серверу SYN (первая запись). Сообщение содержит запрос на установление соединения и размер MSS. Подтверждение, отправленное сервером клиенту ACK (вторая запись) и указанием установленного размера MSS. Следующая запись это подтверждение, переданное клиентом серверу о начале соединения. Аналогичным образом можно рассмотреть любые пакеты переданные во время соединения.

Воспользуемся средством анализа Меню->Statistics->IO Graph. При выборе открывается окно, в котором можно в графическом виде получить иллюстрацию процесса обмена данными. Оперирруя доступными органами управления, можно установить удобную форму отображения, а также нужный масштаб горизонтальной и вертикальной осей графика. На рисунке 4 приведена иллюстрация процесса передачи данных между клиентом и сервером.

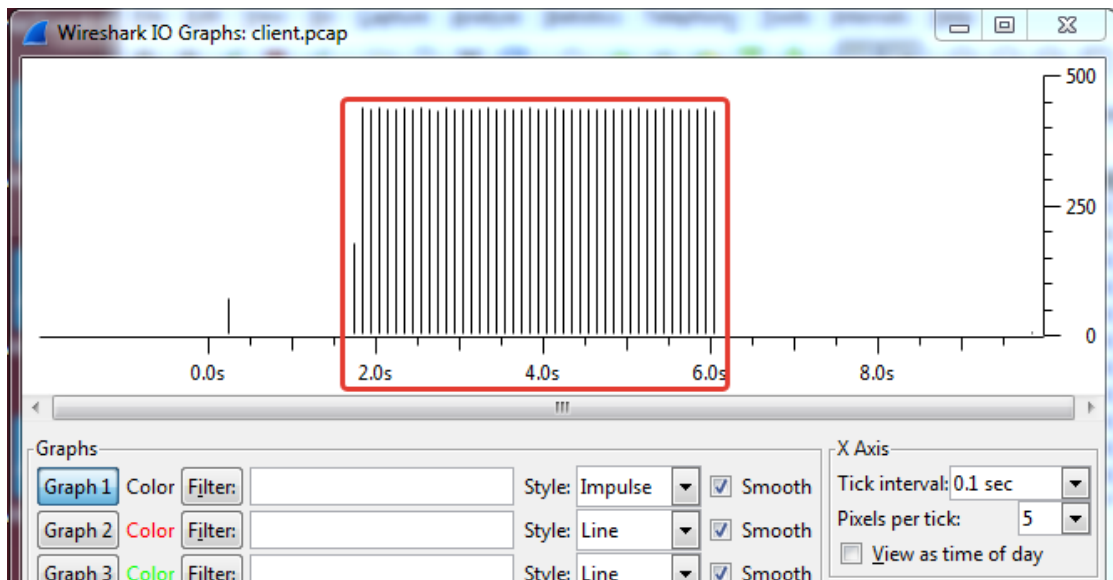


Рисунок 4 Диаграмма потока пакетов в Wireshark

Из рисунка 4 видно, что фактическое время передачи файла размером 5 Мбайт, через канал с пропускной способностью 10 Мбит/с, заняло около 4,5 с. Это говорит о том, что пропускная способность канала использовалась приблизительно на 90%. Это можно считать приемлемой величиной использования ресурса.

На рисунке 5 приведена диаграмма, полученная в результате моделирования. На диаграмме приведена кривая, демонстрирующая изменение окна перегрузки сервера (cwnd), а также моменты потери сегментов данных (drop).

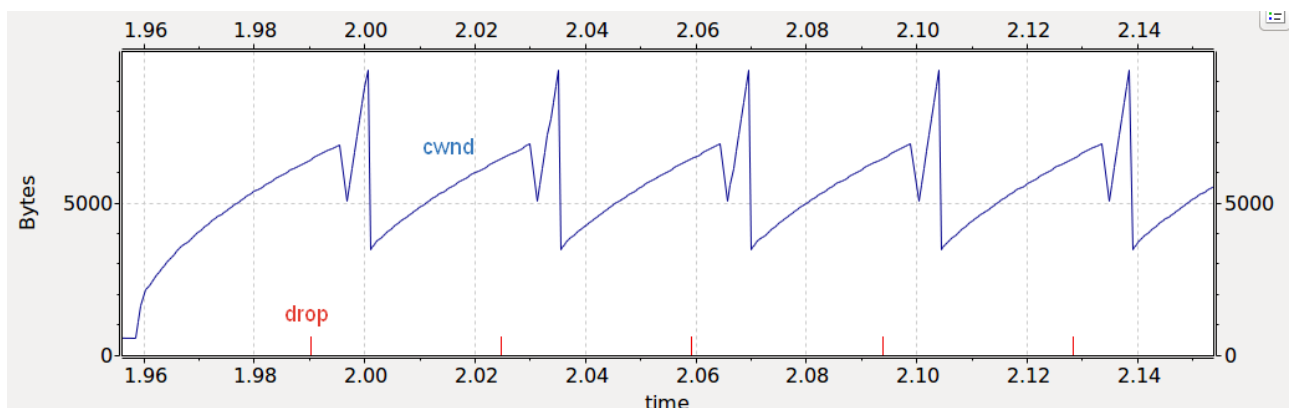


Рис.5 Изменение cwnd и потерь от времени

Из диаграммы видно, что это изменение имеет периодический характер. Рассмотрим первый период. Значение cwnd возрастает до некоторого момента – это момент обнаружения потери сегмента. После этого момента уменьшается значение ssthresh до половины текущего значения cwnd. Окно перегрузки устанавливается на этот порог плюс три сегмента. Далее cwnd увеличивается на 1 сегмент с каждым полученным повторным

подтверждением, это приводит его быстрому увеличению. Когда приходит новое подтверждение окно устанавливается на значение `ssthresh`. После этого цикл повторяется.

Приведенные выше результаты получены для идеального случая, когда потери пакетов происходят только по причине переполнения буфера. В реальном случае потери могут возникнуть и по причине искажений передаваемых данных в линии связи, в наибольшей степени этот процесс выражен в беспроводных линиях связи. Модифицируем нашу модель, изменив свойства канала. Введем ненулевую вероятность искажения передаваемых бит. Для этого в конец файла «`ini`» добавим строку «`** .ber=0.007`», рисунок 6.

```
*.configurator.config+xml("<config><interface hosts='*' address='192.168.1.x' netmask='255.255.255.0'/></config>")  
** .ber = 0.007
```

Рисунок 6 - Изменение файла «`ini`»

Этим изменением мы задали вероятность потери пакета в линии связи равную $per = 7 \cdot 10^{-3}$.

Снова выполним имитационный эксперимент и воспользуемся данными из файла «`server.pcap`». Построим график аналогичный рисунку 4. Он приведен на рисунке 5.

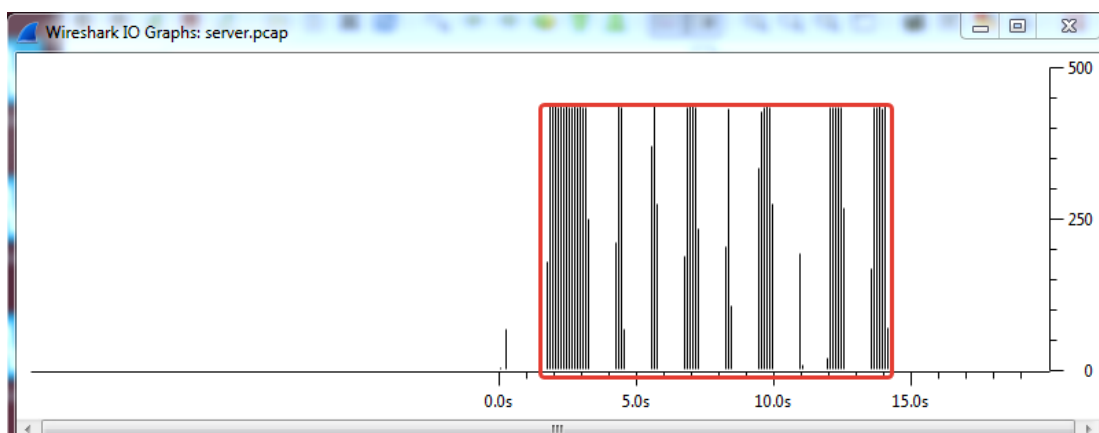


Рисунок 5 - Диаграмма потока пакетов при ненулевой вероятности ошибок

Аналогичную диаграмму можно получить, используя статистику из векторного файла, рисунок 6.

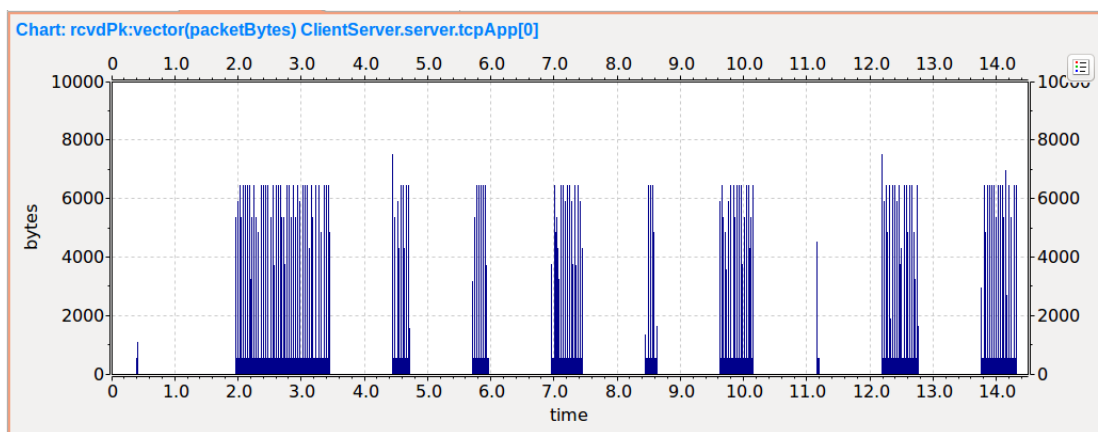


Рисунок 6 - Диаграмма потока пакетов по данным статистики

Из приведенных диаграмм видно, что полное время передачи файла составило около 12 с. Использование пропускной способности канала в этом случае составляет приблизительно 33%. Фактически, средняя скорость передачи данных 3,3 Мбит/с.

Проведенные эксперименты позволяют показать, что эффективность протокола в значительной степени зависит от свойств линии (канала) связи. Можно заметить, что при росте вероятности битовых ошибок в канале, полоса пропускания, при использовании протокола, TCP значительно уменьшается.

До вероятности потери пакета 5% для приблизительной оценки полосы пропускания можно использовать выражение

$$bw = \frac{1,22 MTU}{RTT \sqrt{P_{loss}}} \text{ бит/с} \quad ()$$

где MTU – максимальный размер передаваемого кадра (бит);

RTT – «круговая» задержка (с);

P_{loss} - вероятность потери кадра.

Среднее значение RTT может быть найдено в результатах, оно равно 0,0038. Тогда согласно данной формуле $bw \approx 2,2$ Мбит/с. Это значение занижено, по сравнению с полученной ранее оценкой (3,3 Мбит/с).

4 Выводы

1. В ходе выполнения лабораторной работы была построена имитационная модель сети передачи данных и выполнен анализ функционирования протокола TCP. Для анализа трафика, помимо средств OMNeT++ была использована программа Wireshark.

2. Результаты моделирования показали, что протокол TCP позволяет достаточно эффективно использовать пропускную способность линий связи, было получено значение 90%, при нулевой вероятности битовых ошибок в линии связи.

3. С ростом вероятности ошибок в передаваемых данных эффективность протокола ТСР снижается. При вероятности ошибки в пакете равной $per = 7 \cdot 10^{-3}$ использование полосы пропускания снижается до 33%.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

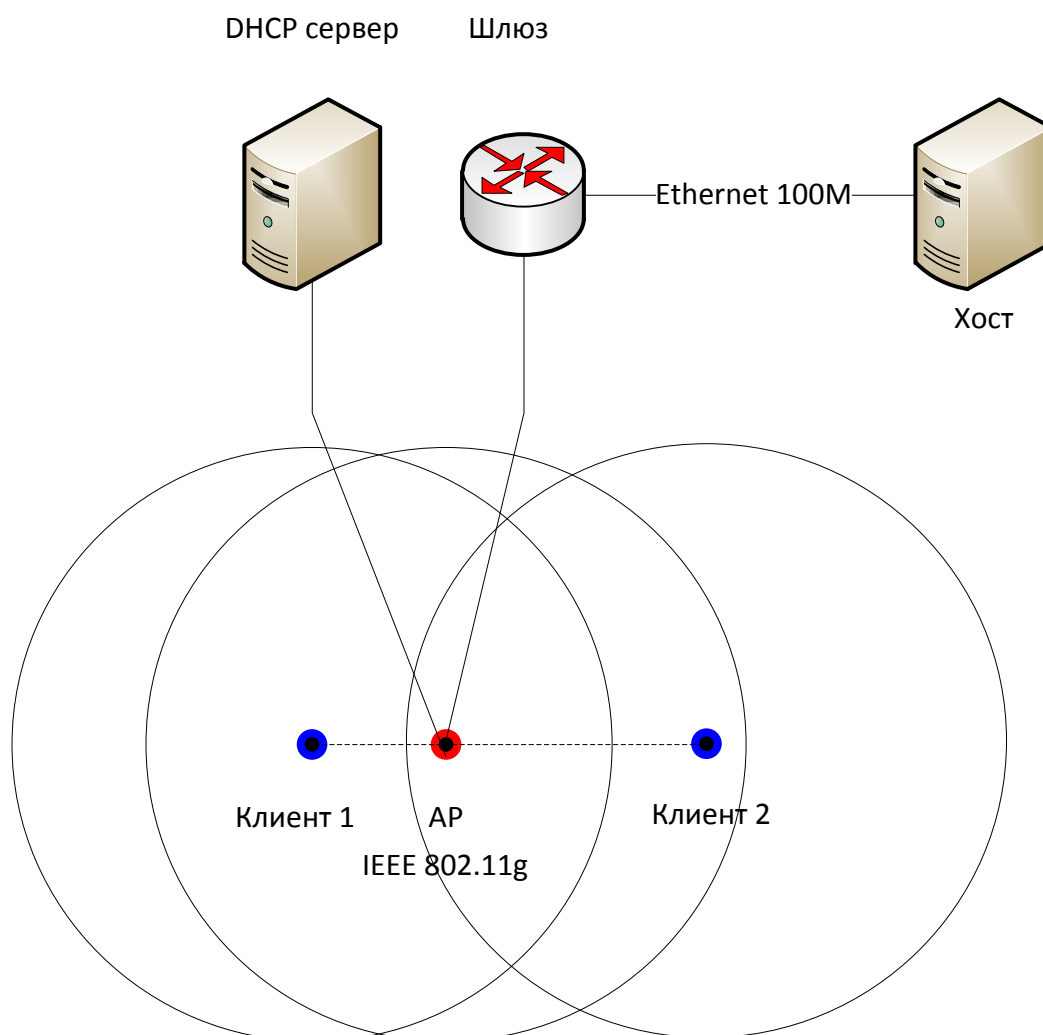
Варианты заданий на лабораторную работу №7

Таблица П.1.1 - Параметры модели

№ Варианта	Расстояния между клиентами и точкой доступа, м	Параметры модели	
		Размер передаваемого файла, Мбайт	Мощность передатчика, мВт
1	30, 50, 70, 90,100	5	1
2	35, 55, 65 99,105	7	2
3	20, 35, 55, 80,90	9	3
4	10, 20, 30, 90,100	10	4
5	30, 50, 70, 90,100	12	5
6	35, 55, 65 99,105	15	6
7	20, 35, 55, 80,90	17	7
8	10, 20, 30, 90,100	20	8
9	30, 50, 70, 90,100	22	9
10	35, 55, 65 99,105	5	10
11	20, 35, 55, 80,90	7	11
12	10, 20, 30, 90,100	9	12
13	30, 50, 70, 90,100	10	13
14	35, 55, 65 99,105	12	14
15	20, 35, 55, 80,90	15	15
16	10, 20, 30, 90,100	17	16
17	30, 50, 70, 90,100	20	17
18	35, 55, 65 99,105	22	18
19	20, 35, 55, 80,90	5	19
20	10, 20, 30, 90,100	7	14
21	30, 50, 70, 90,100	9	15
22	35, 55, 65 99,105	10	16
23	20, 35, 55, 80,90	12	17
24	10, 20, 30, 90,100	15	18
25	30, 50, 70, 90,100	17	19
26	35, 55, 65 99,105	20	10
27	20, 35, 55, 80,90	22	20
28	10, 20, 30, 90,100	10	30
29	35, 55, 65 99,105	12	40
30	20, 35, 55, 80,90	15	50

Структура сети:

1. Моделируемая сеть состоит из точки доступа стандарта IEEE 802.11g, имеющей в своем составе DHCP сервер и шлюз, нескольких клиентов и хоста (сервера), подключенного к шлюзу через проводное соединение.
2. Функционирование. Клиент инициирует сессию и отправляет файл серверу, сервер поддерживает TCP соединение до окончания передачи файла или истечения установленного времени имитации.
3. Время моделирования до окончания отправки файлов клиентами (не менее продолжительности TCP сессий).



Пример оформления лабораторной работы №7

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №7
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

**Исследование сети беспроводного широкополосного
доступа в OMNeT++**

(пример отчета по лабораторной работе №7)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

Исходные данные и требования

Таблица 1 – Параметры исследуемой сети, согласно варианту задания

Параметр	Ед.изм.	Значение
Стандарт сети	-	IEEE 802.11g
Количество точек доступа (AP)	шт.	1
Максимальное количество клиентов	шт.	5
Расстояние MS1 – AP	м	20
Расстояние MS2 – AP	м	40
Мощность передатчиков	мВт	2

Структура модели согласно варианту задания.

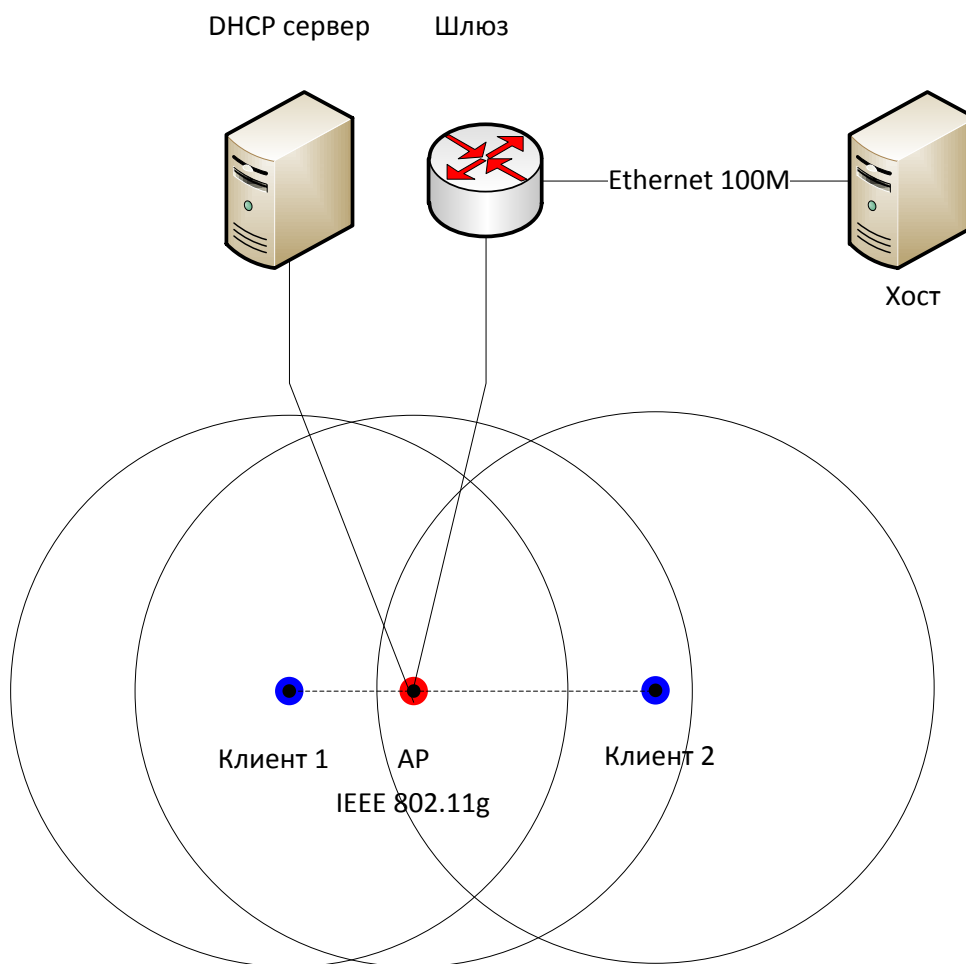


Рисунок 1 – Структура исследуемой сети

1 Построение имитационной модели

Для анализа функционирования сети БШПД реализуем модель, содержащую три элемента: два хоста (client 1 и client 2) и точку беспроводного широкополосного доступа (ap). Хосты удалены от точки доступа на различное расстояние: 100 м, соответственно. Точки, соответствующие координатам хостов и точки доступа лежат на одной прямой. В качестве точки доступа рассматривается WiFi маршрутизатор, включающий в состав DHCP сервер и шлюз. К маршрутизатору с помощью проводного соединения подключен хост (Ethernet 100 Мбит/с). В ходе имитационных экспериментов производится оценка пропускной способности каналов между клиентами (client 1 и client 2) и хостом, включенным в маршрутизатор (remote).

Содержимое файла NED приведено ниже.

```
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth100M;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.node.inet.WirelessHost;
import inet.node.wireless.AccessPoint;
import
inet.physicallayer.ieee80211.packetlevel.Ieee80211ScalarRadioMedium;

network WirelessNetWithDHCP
{
  @display("bgb=590,407;bgl=2");
  int numHosts;
  **.mgmt.numChannels = 5;
  submodules:
    radioMedium: Ieee80211ScalarRadioMedium {
      @display("p=64,34");
    }
    gateway: Router {
      @display("p=339,99");
    }
    client[numHosts]: WirelessHost {
      @display("r=.,#707070;p=300,312"); //( "r=.,#707070;p=245,285");
    }
    ap: AccessPoint {
      @display("p=300,218");
    }
    dhcpServer: StandardHost {
      @display("p=261,99");
    }
  }
```



```

}
configurator: IPv4NetworkConfigurator {
  parameters:
    @display("p=180,35");
}
remote: StandardHost {
  @display("p=504,99");
}
connections:
  gateway.ethg++ <--> Eth100M <--> ap.ethg++;
  gateway.ethg++ <--> Eth100M <--> remote.ethg++;
  dhcpServer.ethg++ <--> Eth100M <--> ap.ethg++;
}

```

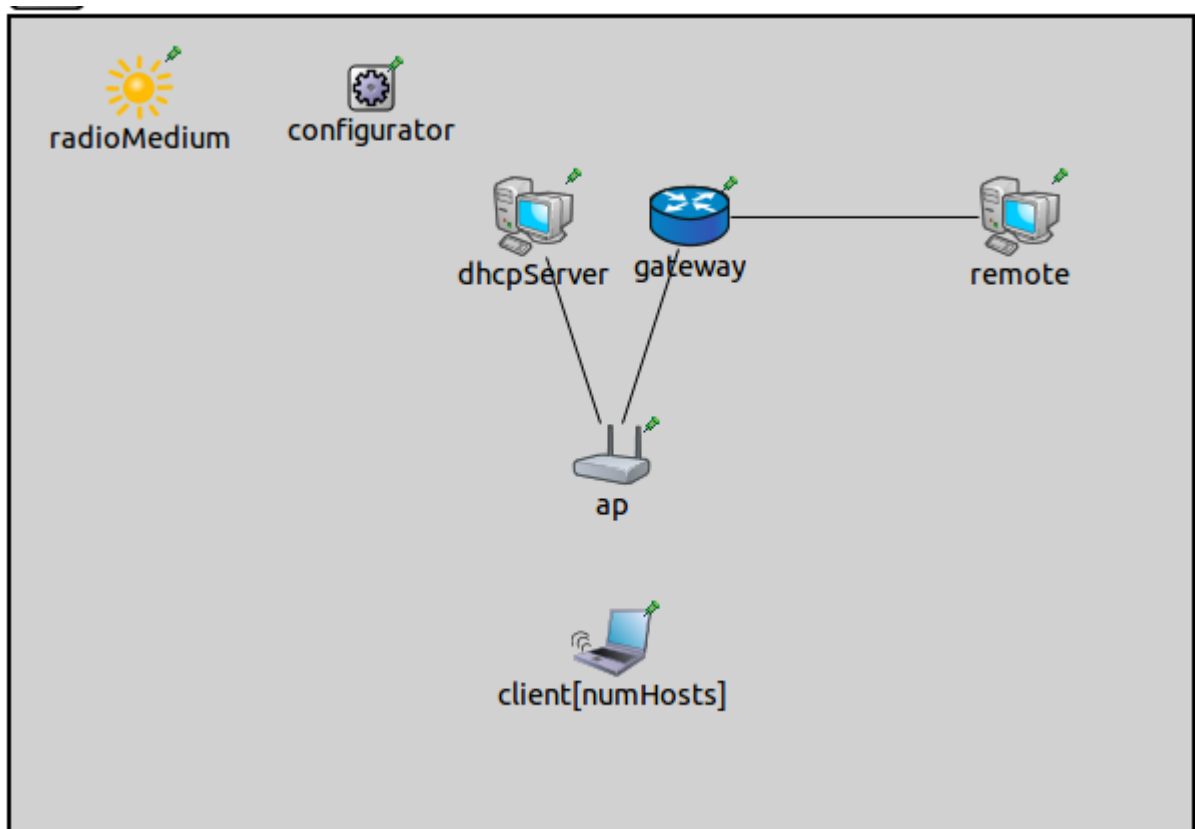


Рисунок 1 - Структура сети

Элементы модели:

AccessPoint – ap;

StandardHost – dhcpServer, remote;

Router – gateway;

WirelessHost – client.

Далее выберем (или создадим) файл инициализации «ini». Откроем файл в редакторе, введем имя конфигурации «WindowSize», «Simulation time limit» введем значение 200s. Перейдем в текстовый режим редактирования

«ini» файла, выбав вкладку «Source» и введем (или скопируем) следующие параметры.

Содержимое файла ini приведено ниже.

```
[General]
tkenv-plugin-path = ../../etc/plugins
sim-time-limit = 200s
```

```
[Config WirelessDHCP]
description = Wireless hosts configured via DHCP
network = WirelessNetWithDHCP
**.mobility.constraintAreaMinX = 0m
**.mobility.constraintAreaMinY = 0m
**.mobility.constraintAreaMinZ = 0m
**.mobility.constraintAreaMaxX = 600m
**.mobility.constraintAreaMaxY = 600m
**.mobility.constraintAreaMaxZ = 0m
**.client[*].mobilityType = "StationaryMobility"
**.client[*].mobility.initFromDisplayString = false
**.client[0].mobility.initialX = 300m
**.client[0].mobility.initialY = 300m
**.client[1].mobility.initialX = 310m
**.client[1].mobility.initialY = 300m
**.ap.mobilityType = "StationaryMobility"
**.ap.mobility.initFromDisplayString = false
**.ap.mobility.initialX = 300m
**.ap.mobility.initialY = 300m
**.configurator.config = xml("<config><interface hosts='gateway'
names='eth0' address='192.168.0.1' netmask='255.255.255.0'/><interface
names='eth*' address='192.168.x.x' netmask='255.255.255.0'/></config>")

**.numHosts = 2 #Число хостов (клиентов)

# DHCP client in the wireless hosts
**.client[*].numUdpApps = 1
**.client[*].udpApp[0].typename = "DHCPClient"
**.client[*].numPingApps = 1
**.client[*].pingApp[0].destAddr = "remote"
**.client[*].pingApp[0].startTime = 3s

# DHCP server for the wireless network
**.dhcpServer.numUdpApps = 1
**.dhcpServer.udpApp[0].typename = "DHCPServer"
**.dhcpServer.udpApp[0].subnetMask = "255.255.255.0"
**.dhcpServer.udpApp[0].ipAddressStart = "192.168.0.10"
```

```

**.dhcpServer.udpApp[0].maxNumClients = 100
**.dhcpServer.udpApp[0].gateway = "192.168.0.1"
**.dhcpServer.udpApp[0].dns = "192.168.0.1"
**.dhcpServer.udpApp[0].leaseTime = 100s
**.remote.numTcpApps = 1
**.remote.tcpApp[*].typename = "TCPSinkApp"
**.remote.tcpApp[0].localPort = 1000
**.remote.tcpApp[0].echoFactor = 1
**.remote.tcpApp[0].echoDelay = 0
**.client[*].numTcpApps = 1
**.client[*].tcpApp[0].typename = "TCPSessionApp"
**.client[0].tcpApp[0].active = true
#**.client[1].tcpApp[0].active = true
**.client[*].tcpApp[0].localPort = -1
**.client[*].tcpApp[0].connectAddress = "remote"
**.client[*].tcpApp[0].connectPort = 1000
**.client[*].tcpApp[0].tOpen = 5.0s
**.client[*].tcpApp[0].tSend = 0.2s
**.client[*].tcpApp[0].sendBytes = 50000000B
**.client[*].tcpApp[0].sendScript = ""
**.client[*].tcpApp[0].tClose = 60s
**.client[*].numPcapRecorders = 1
**.client[0].pcapRecorder[*].pcapFile = "client0.pcap"
**.client[1].pcapRecorder[*].pcapFile = "client1.pcap"
**.mac.address = "auto"
**.mac.maxQueueSize = 14
**.mac.rtsThresholdBytes = 3000B
**.wlan[*].radioType = "Ieee80211ScalarRadio"
**.wlan[*].opMode = "g"
**.wlan[*].mac.retryLimit = 7
**.wlan[*].mac.cwMinData = 7
**.wlan[*].mac.cwMinBroadcast = 31
**.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
**.wlan[*].radio.transmitter.headerBitLength = 100b
**.wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
**.wlan[*].radio.receiver.snirThreshold = 4dB

```

После ввода «NED» и «ini» файла можно запустить имитационный эксперимент, рисунок 2.

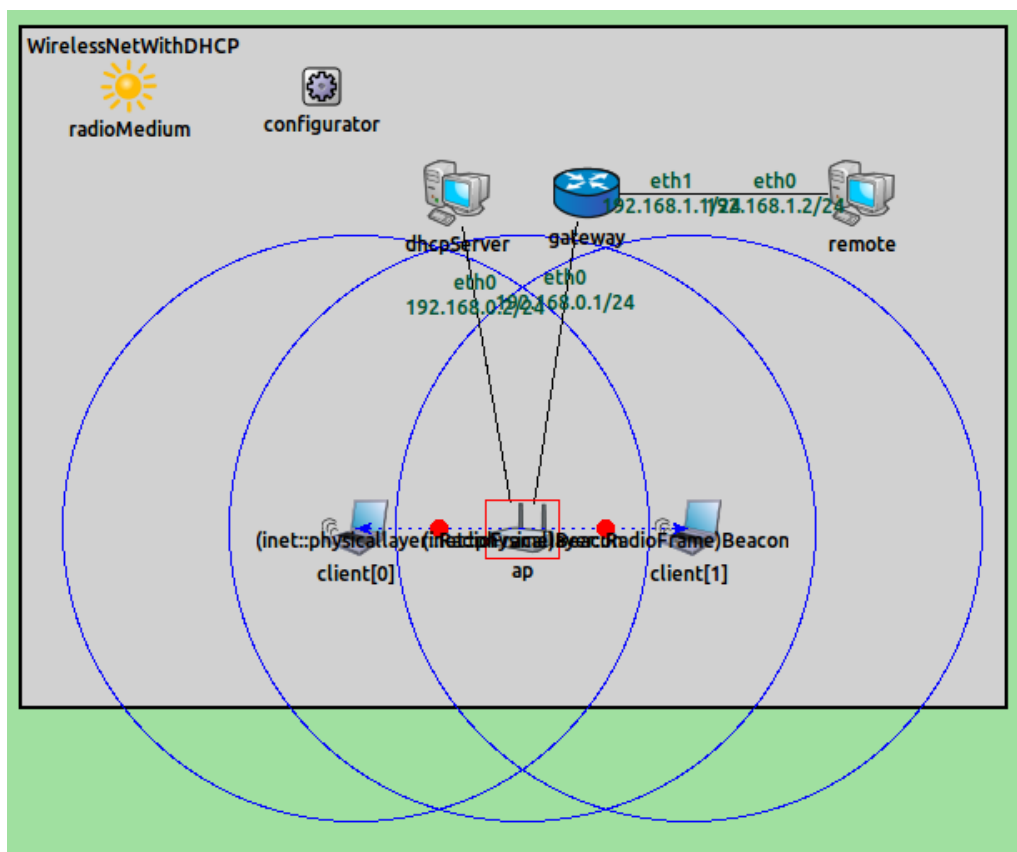


Рисунок 2 - Анимация в процессе имитационного эксперимента

В результате проведения эксперимента формируются файлы статистики, а также файлы «client0.pcap» и «client1.pcap», которые содержат подробные записи обо всех пакетах (сегментах) пересылаемых между клиентом и сервером (remote). Эти файлы могут быть открыты программой «Wireshark». На рисунке 3 приведен пример отображения в Wireshark данных об обмене данными между клиентом и сервером во время проведения имитационного эксперимента. В таблице по каждому из сегментов отображаются номер пакета, время (модельное время), IP адреса источник и получателя, протокол, длина и дополнительная информация. При выборе пакета из списка о нем может быть получена подробная информация о содержимом заголовка и тела пакета.

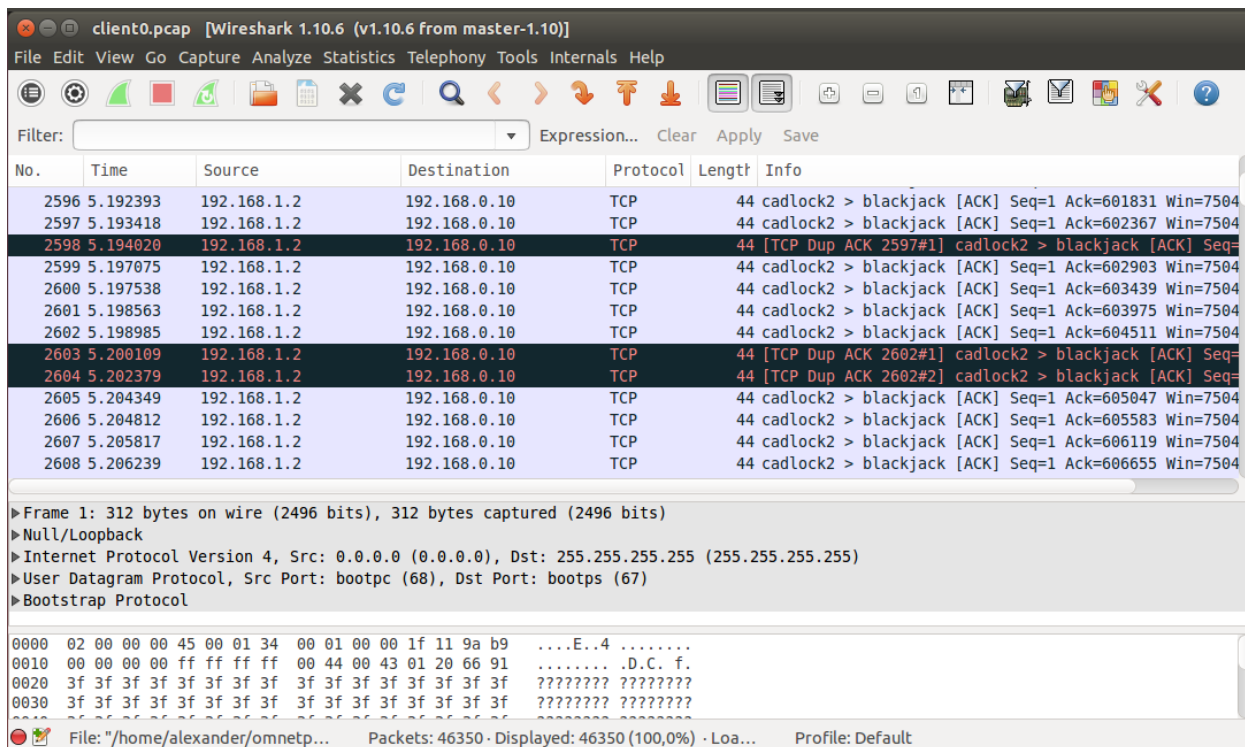


Рисунок 3 - Анализ потока в Wireshark

Эти данные позволяют провести детальный анализ обмена пакетами на протяжении всего TCP соединения. Например, рассматривая записи в начале списка можно увидеть сообщение от клиента к серверу SYN (первая запись). Сообщение содержит запрос на установление соединения и размер MSS. Подтверждение, отправленное сервером клиенту ACK (вторая запись) и указанием установленного размера MSS. Следующая запись это подтверждение, переданное клиентом серверу о начале соединения. Аналогичным образом можно рассмотреть любые пакеты переданные во время соединения.

Воспользуемся средством анализа Меню->Statistics->IO Graph. При выборе открывается окно, в котором можно в графическом виде получить иллюстрацию процесса обмена данными. Оперирруя доступными органами управления, можно установить удобную форму отображения, а также нужный масштаб горизонтальной и вертикальной осей графика. На рисунке 4 приведена иллюстрация процесса передачи данных между клиентом и сервером.

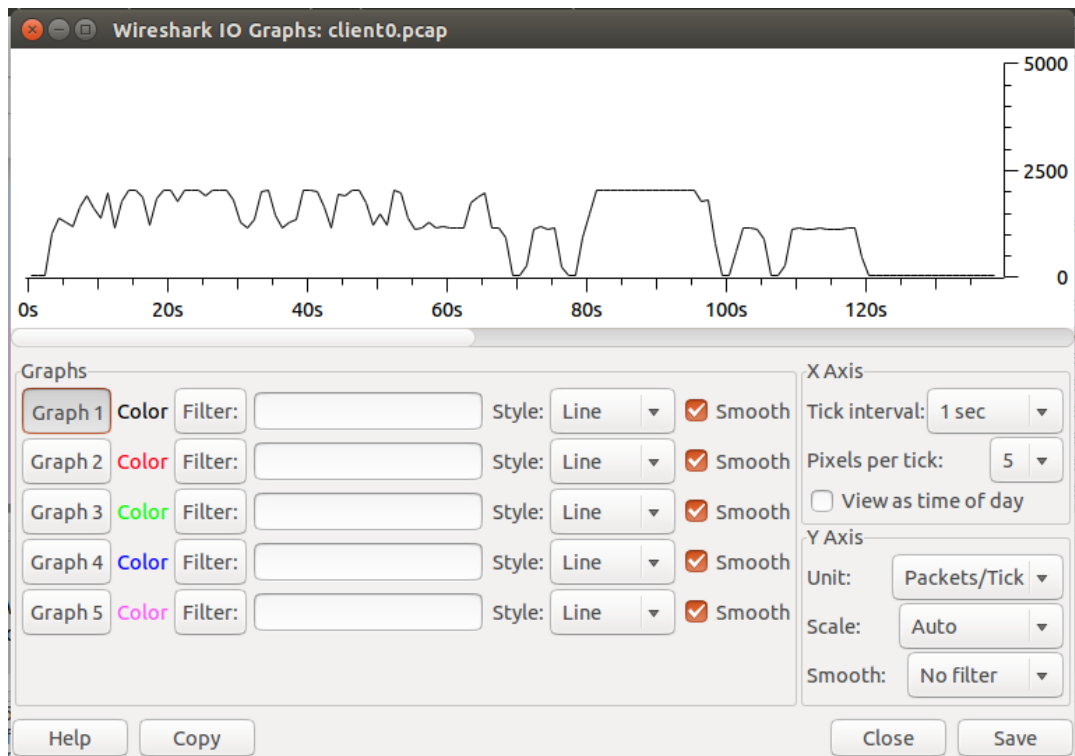


Рисунок 4 Диаграмма потока пакетов в Wireshark (client0)

Из рисунка 4 видно, что фактическое время передачи файла размером 25 Мбайт, через канал заняло около 115 с. Средняя скорость передачи данных составила 1,74 Мбит/с.

Для хоста client 2 график передачи данных приведен на рисунке 5.

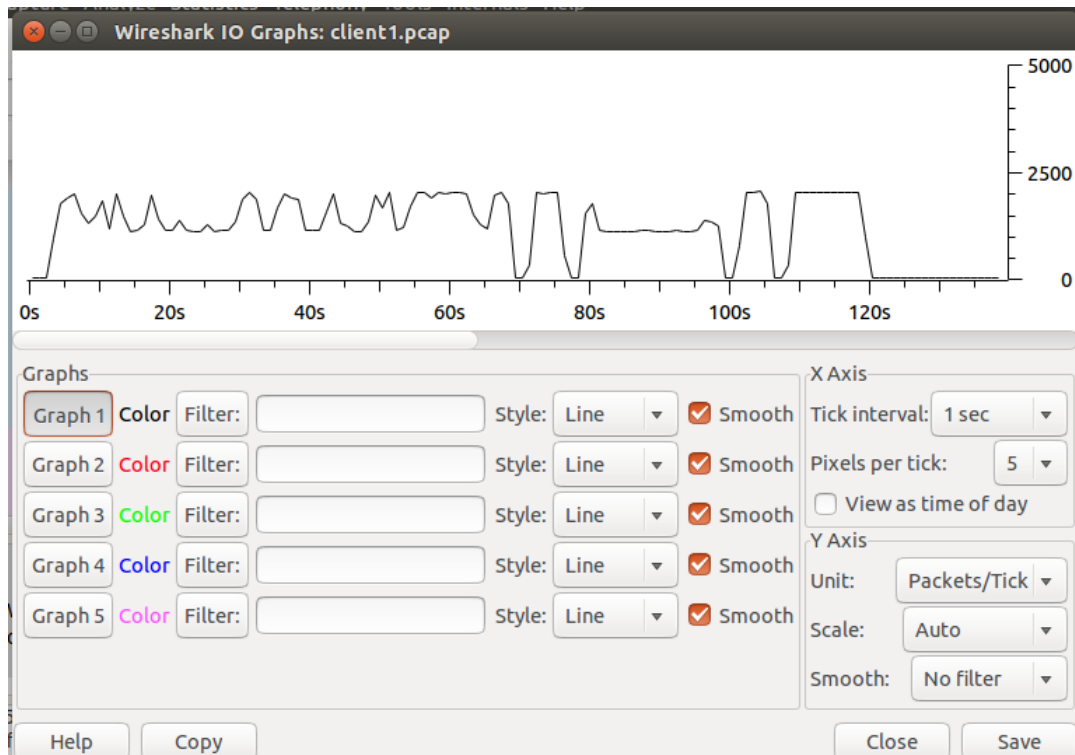


Рисунок 5 Диаграмма потока пакетов в Wireshark (client1)

Из рисунка 5 видно, что средняя скорость передачи данных для хоста client1 близка к скорости передачи данных client0 (1,74 Мбит/с).

Суммарная скорость передачи составила около 3,5 Мбит/с.

Изменим количество клиентов, оставив только одного (client0). Для хоста client0 график передачи данных приведен на рисунке 6.

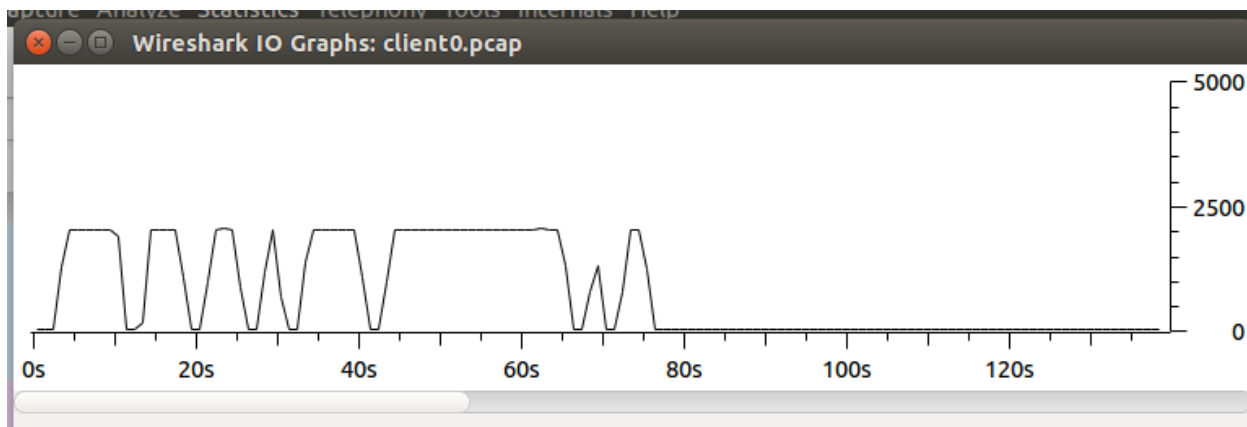


Рисунок 6 Диаграмма потока пакетов в Wireshark (client0)

Из рисунка 6 видно, что фактическое время передачи файла размером 25 Мбайт, через канал заняло около 71 с. Средняя скорость передачи данных составила 2,82 Мбит/с.

В таблице 1 приведены данные о зависимости скорости передачи данных (загрузки файла) от количества клиентов точки доступа.

Таблица 1 - зависимости скорости передачи данных (загрузки файла) от количества клиентов точки доступа

Количество клиентов, шт.	Скорость загрузки файла, Мбит/с
1	2,82
2	1,74
3	1,01
4	0,88
5	0,70

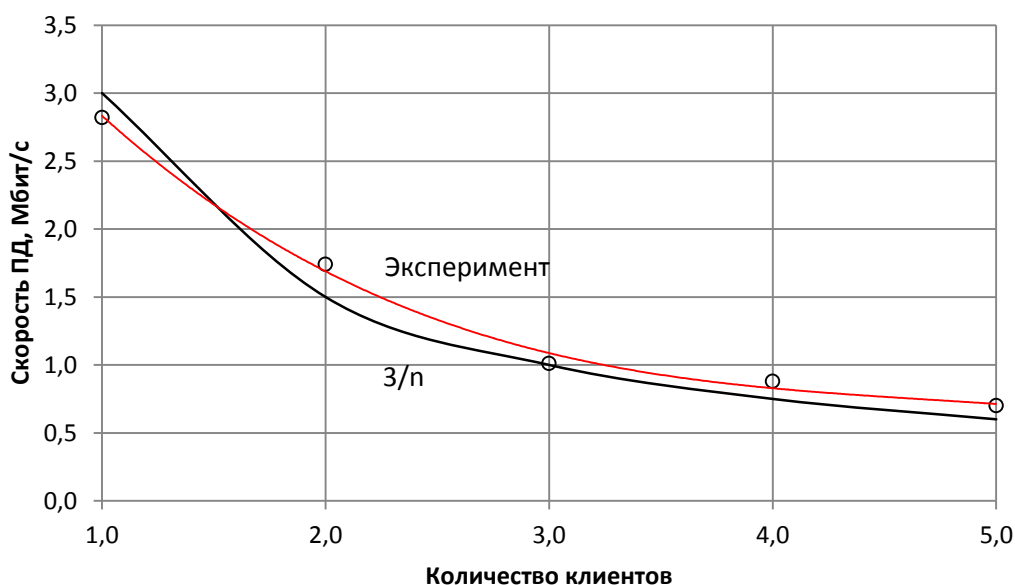


Рисунок 7 Зависимость скорости ПД от количества клиентов

Полученная зависимость скорости передачи данных от количества клиентов аппроксимирована кривой

$$b(b) = 3 / n \text{ (Мбит/с)}$$

где n - количество клиентов.

4 Выводы

1. В ходе выполнения лабораторной работы была построена имитационная модель сети беспроводного широкополосного доступа стандарта IEEE 802.11g, включающая в себя DHCP сервер и шлюз.

2. Результаты моделирования показали, что при использовании протокола TCP максимальная скорость передачи данных (при загрузке файла) клиентом составляет около 3 Мбит/с.

3. С увеличением количества клиентов (производящих загрузку данных) скорость передачи данных из расчета на одного клиента снижается. Полученная зависимость аппроксимирована кривой $3/n$ (Мбит/с), где n – количество клиентов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Варианты заданий на лабораторную работу №8

Требуется произвести оценку параметров трафика (интенсивности пакетов, среднего размера пакета и интенсивности трафика на уровне пользователя) при предоставлении услуги связи.

Исходные данные

№ Варианта	Услуга	Адрес
1	видео	www.youtube.com
2	видео	1tv.ru
3	видео	http://live.russia.tv/
4	аудио	http://www.radiorus.ru/
5	аудио	https://radio.yandex.ru/
6	аудио	http://maximum.ru/online/maximum
7		
8		
9		
10		

Пример оформления лабораторной работы №8

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №8
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Анализ параметров трафика сети передачи данных

(пример отчета по лабораторной работе №8)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

1. Описание модельной сети и условий проведения измерений

1.1 Точка регистрации трафика

В данном исследовании выполняется анализ клиентского трафика на интерфейсе пользователь сеть. Модельная сеть представляет собой компьютер, включенный в локальную сеть передачи данных и имеющий доступ к сети Интернет, либо непосредственно включенный в сеть провайдера услуг доступа в Интернет.

1.2 Средства измерений

Для измерений параметров трафика используется свободно распространяемое программное обеспечение Wireshark.

1.3 Подготовка к проведению измерений

Скачать с сайта <https://www.wireshark.org/download.html> и установить, если ранее не было установлено программное обеспечение Wireshark.

1.4 Выбор услуги

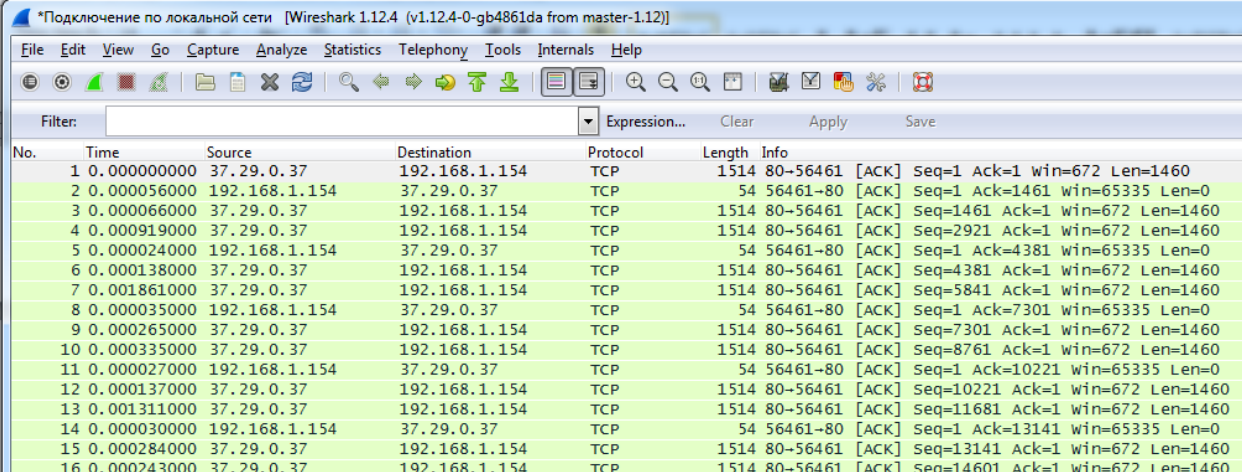
Анализ трафика выполняется для услуги потокового видео. Услуга предоставляется в сети Интернет адрес сайта 1tv.ru.

2. Проведение измерений и подготовка данных

Открываем в браузере указанный сайт и выбираем онлайн трансляцию. В окне браузера отображается видео трансляции.

Запускаем Wireshark и выбираем локальную сеть (Ethernet карту), запускаем захват пакетов.

Наблюдаем в окне Wireshark непрерывно пополняемый список пакетов регистрируемых на выбранном интерфейсе (рисунок 1).



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=1 Ack=1 win=672 Len=1460
2	0.000056000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=1461 win=65335 Len=0
3	0.000066000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=1461 Ack=1 win=672 Len=1460
4	0.000919000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=2921 Ack=1 win=672 Len=1460
5	0.000024000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=4381 win=65335 Len=0
6	0.000138000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=4381 Ack=1 win=672 Len=1460
7	0.001861000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=5841 Ack=1 win=672 Len=1460
8	0.000035000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=7301 win=65335 Len=0
9	0.000265000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=7301 Ack=1 win=672 Len=1460
10	0.000335000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=8761 Ack=1 win=672 Len=1460
11	0.000027000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=10221 win=65335 Len=0
12	0.000137000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=10221 Ack=1 win=672 Len=1460
13	0.001311000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=11681 Ack=1 win=672 Len=1460
14	0.000030000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=13141 win=65335 Len=0
15	0.000284000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=13141 Ack=1 win=672 Len=1460
16	0.000243000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=14601 Ack=1 win=672 Len=1460

Рисунок 1 – Результат регистрации потока пакетов

Продолжаем процесс, пока число захваченных пакетов не достигнет, ориентировочно 20 000, после чего останавливаем процесс захвата пакетов.

Полученные данные, при необходимости, можно сохранить в файл для дальнейшей обработки.

2.2 Подготовка данных для анализа распределения

Среди захваченных пакетов выделяем пакеты потока видео. Для этого находим среди них IP адрес источника пакетов.

Введя в поле «Filter» строку `ip.src==XX.XX.XX.XX`, где `XX.XX.XX.XX` IP адрес источника и нажав Enter отфильтровываем только пакеты, поступившие от выбранного источника (рисунок 2).

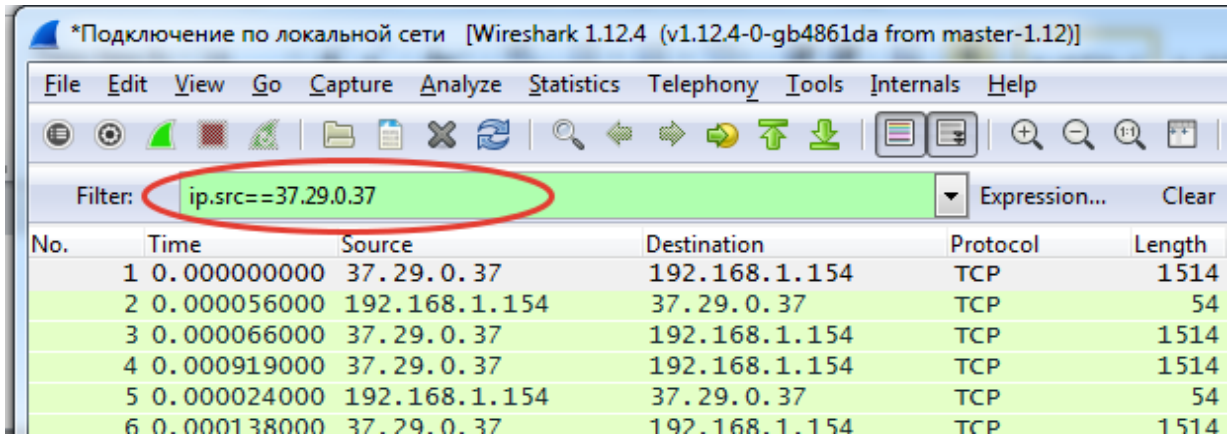


Рисунок 2 – Фильтрация потока

3. Оценка параметров трафика

В меню Wireshark выбираем пункт `Statistics->Summary` (рисунок 3). В открывшемся окне находим такие параметры как: интенсивность пакетов (среднее число пакетов в секунду), средний размер пакета, интенсивность трафика (Мбит/с).

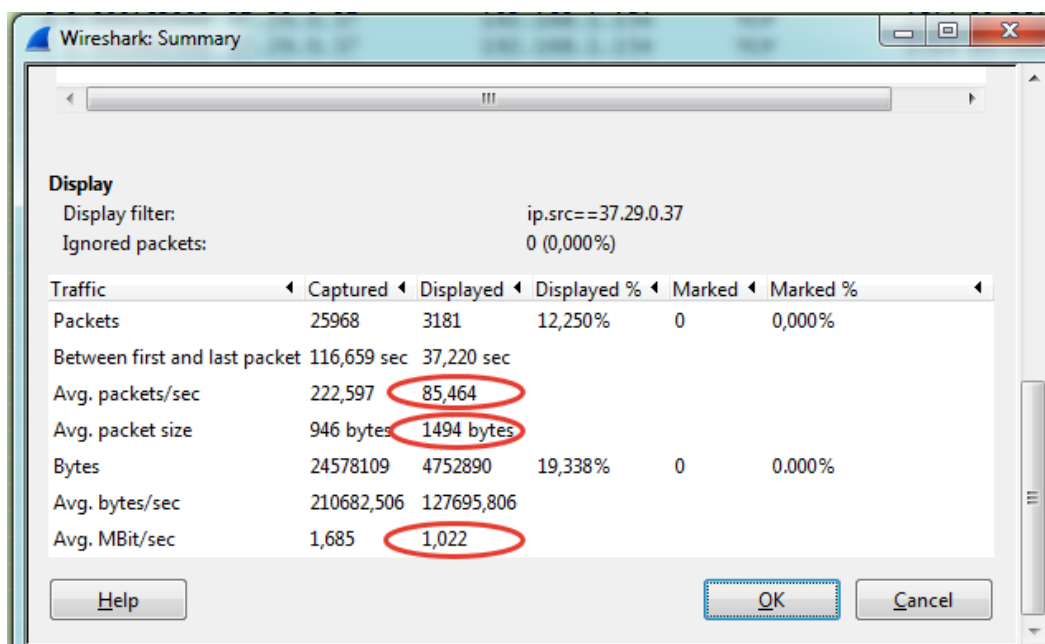
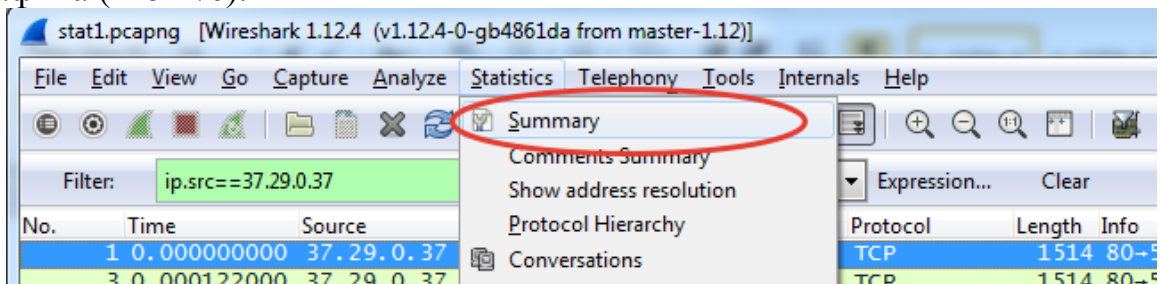


Рисунок 3 – Выбор оценок параметров трафика

Согласно данным программы, интенсивность пакетов $\lambda=85,464$ пакета/с, средний размер пакета $L=1494$ байта, интенсивность трафика $a=1,022$ Мбит/с.

4. Доверительные интервалы для полученных оценок

1. Доверительный интервал для интенсивности пакетов

Выберем меню Statistics->IO Graph. В полк «Filter» вводим IP адрес источника пакетов и нажимаем Enter. Проверяем значения в полях, выделенных на рисунке 4.

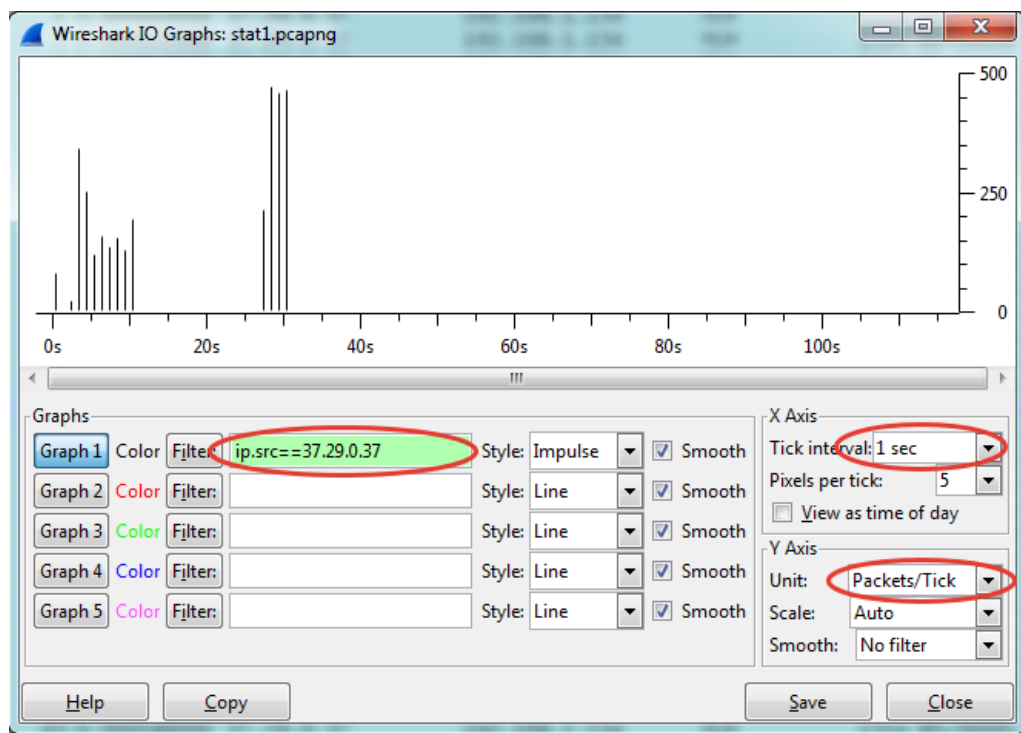


Рисунок 4 – Получение значений за секундные интервалы

Нажимаем кнопку «Сору». Открываем табличный процессор (в данном примере MS Excel) и вставляем данные через «мастер вставки», как текст с разделителями, выбрав в качестве разделителя запятую. В результате получаем таблицу приведенную на рисунке 5.

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the 'Вставка' (Insert) tab active. The data is pasted into the following table:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Interval st Graph 1							
2	0.000	80						
3	1.000	0						
4	2.000	22						
5	3.000	340						
6	4.000	250						
7	5.000	117						

Рисунок 5 – Экспорт данных в табличный процессор

В таблице число строк равно числу секунд. В первом столбце номер секунды, а во втором столбце число зарегистрированных пакетов.

Для проверки своих действий вычислим интенсивность пакетов просуммировав число пакетов во втором столбце и разделив его на время регистрации пакетов (Рисунок 3 – 37,220 с), рисунок 6.

	A	B	C	D	E	F	G
37	35.000	0					
38	36.000	0					
39	37.000	2					
40	Среднее	85,465					
41	СКО	141,400					
42	Дов. инт.	38,236					
43							

Рисунок 6 Вычисление среднего значения

В результате получили 85,465 (на рисунке 3 – 85,464). Разница результатов в 0,001 обусловлена операциями округления, будем считать ее незначительной.

Далее для данного столбца вычислим среднеквадратическое отклонение (СКО) и полуширину доверительного интервала, рисунок 7.

	A	B	C	D	E	F
37	35.000	0				
38	36.000	0				
39	37.000	2				
40	Среднее	85,465				
41	СКО	141,400				
42	Дов. инт.	38,236				

Рисунок 7 Вычисление доверительного интервала для интенсивности пакетов

При вычислении доверительного интервала выберем доверительную вероятность 0,9.

Таким образом, результат оценки интенсивности пакетов можно записать как

$$\lambda = 85 \pm 38 \text{ пакетов/с.}$$

(Как видим, относительная погрешность полученной оценки составляет около 45%)

Примечание. Если в задании требуется более высокая точность, то следует увеличить объем выборки, продолжив измерения. Необходимый объем выборки можно будет определить как

$$N = \left(g_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\lambda \delta_0} \right)^2$$

Например, при допустимой относительной погрешности $\delta_0 = 0,1$ (10%) и доверительной вероятности 0,9 требуемое количество измерений составит

$$N = 1,64 \frac{141.400}{38,236 \cdot 0,1} \approx 3678.$$

2. Доверительный интервал для интенсивности трафика

Доверительный интервал для интенсивности трафика вычисляется аналогичным образом с той разницей, что в начале (Рисунок 5) в поле «Unit» выбирается «Bits/Tick».

Последующие операции аналогичны приведенным выше. В результате получаем (Рисунок 8).

	A	B	C	D	E	F	G
38	36.000	0					
39	37.000	960					
40	Среднее	1,022					
41	СКО	1701233					
42	Дов. инт.	0,460					
43							

Рисунок 8 Вычисление доверительного интервала для интенсивности трафика

Таким образом, результат оценки интенсивности трафика можно записать как

$$a = 1,00 \pm 0,46 \text{ Мбит/с.}$$

При доверительной вероятности 0,9.

3. Доверительный интервал для размера пакета

Из основного окна Wireshark сохраняем отфильтрованные пакеты в файл, рисунок 9.

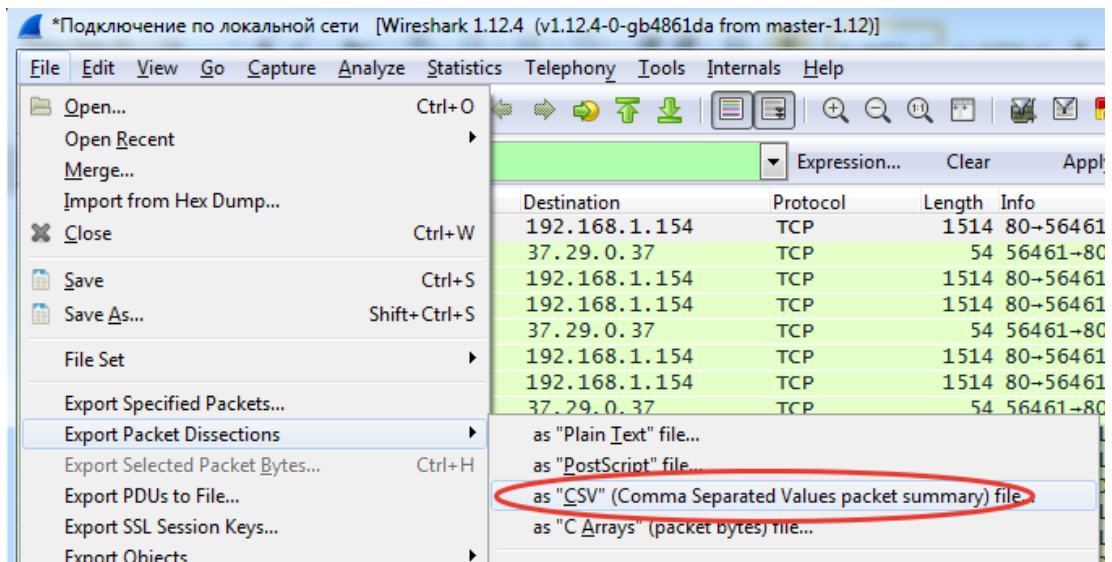


Рисунок 9 – Сохранение данных в текстовый файл

Открываем сохраненный файл из текстового процессора (в данном примере Excel) с использованием мастера импорта, в результате чего получаем таблицу, рисунок 10.

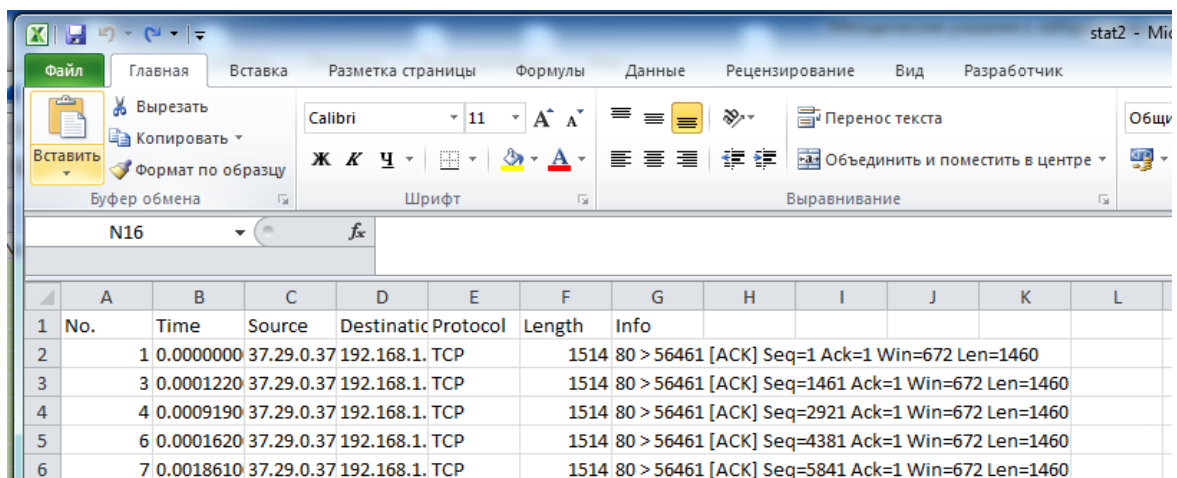


Рисунок 10 – Результат экспорта данных

Удаляем лишние столбцы, оставляя только «Time» и «Length».

Для столбца «Length» вычисляем среднее значение, СКО и доверительный интервал, как это было сделано ранее.

	A	B	C	D	E	F
3181	6.677782000	60				
3182	0.111115000	60				
3183	Среднее	1494				
3184	СКО	158				
3185	Дов. инт.	5				
3186						
3187						

Рисунок 11 – Результат оценки

Таким образом, результат оценки среднего размера пакета можно записать как

$$L = 1494 \pm 5 \text{ байт.}$$

(Как видим, относительная погрешность полученной оценки составляет около 0,3%)

5. Результаты оценки параметров трафика

№	Параметр	Ед. измерения	Значение
1	Интенсивность пакетов	пакетов/с	85±38
2	Интенсивность трафика	Мбит/с	1,00±0,46
3	Размер пакета	байт	1494±5

Характеристики эксперимента

№	Параметр	Ед. измерения	Значение
1	Продолжительность	с	37,220
2	Число пакетов	шт.	3181

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Варианты заданий на лабораторную работу №9

В узел доступа к сети оператора связи включены абоненты, которым предоставляется услуга телефонной связи (VoIP). При предоставлении услуги используется кодек G.711, для связи с узлом оператора используется технология Ethernet.

Параметры кодека:

- скорость кодирования 64 Кбит/с,
- длина пакета данных 200 байт,
- скорость потока в линии Ethernet 85,6 Кбит/с.

Требуется оценить необходимую пропускную способность линии связи между узлом доступа и узлом оператора связи, при которой выполняются требования к качеству обслуживания.

(При расчете задержки принять модель M/M/1)

Исходные данные

№ Варианта	Количество абонентов VoIP	Удельная интенс. абоненткой нагрузки, Эрл	Требования к потерям, %	Требования к задержке, мс
1	1000	0,15	<0,1	<10
2	2000	0,12	<2,0	<20
3	4000	0,10	<1,5	<15
4	4500	0,13	<3,0	<25
5	2500	0,14	<3,5	<22
6	3000	0,08	<4,0	<24
7	7000	0,09	<2,5	<18
8	6500	0,07	<1,5	<12
9	8000	0,05	<0,5	<28
10	7500	0,06	<0,7	<16

Пример оформления лабораторной работы №9

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича

Лабораторная работа №9
по курсу
«Математические модели в сетях связи»

Расчет пропускной способности линии связи

(пример отчета по лабораторной работе №3)

Группа:

Студент: Фамилия И.О.

Вариант:

1. Исходные данные

№	Параметр	Ед. измерения	Значение
1	Количество абонентов	шт.	3700
2	Интенсивность удельной абонентской нагрузки	Эрл	0,10
3	Тип кодека	-	G.711
4	Скорость кодирования	Кбит/с	64
	Скорость в канале	Кбит/с	85,6
	Длина пакета	байт	200
6	Требование к потерям	%	≤ 2
6	Требование к задержке	мс	≤ 5

2. Оценка интенсивности производимого трафика

Интенсивность трафика, производимого абонентами VoIP, оценивается на основе данных об удельной абонентской нагрузке и количестве абонентов

$$y = n \cdot y_0 \text{ Эрл,}$$

где n – количество абонентов,

y_0 - интенсивность удельной абонентской нагрузки (Эрл).

На основе исходных данных получаем

$$y = 3700 \cdot 0,1 = 370 \text{ Эрл,}$$

3. Расчет интенсивности трафика в сети передачи данных

В задании приведено требование к вероятности потерь, которые не должны превышать 2%.

Вероятность потерь, в данном случае, следует рассматривать, как вероятность того, что количество потоков VoIP, превысит значение, на которое рассчитана сеть передачи данных. Таким образом, для заданных интенсивности нагрузки и вероятности потерь, используя 1 формулу Эрланга, оценим количество потоков VoIP, которое должна обслуживать проектируемая сеть.

$$p(y, v) = \frac{\frac{y^v}{v!}}{\sum_{j=0}^v \frac{y^j}{j!}},$$

где y – интенсивность абонентской нагрузки (Эрл),

v – количество потоков VoIP.

Формально, нахождение количества потоков можно записать как

$$v = \underset{v}{\operatorname{argmin}}(p_0 - p(v, y)), \quad p(v, y) \leq p_0$$

где p_0 - заданная норма потерь.

Фактически, это означает отыскание минимального значения v , при котором вероятность потерь не превышает заданную норму.

На основе исходных данных получаем

$$v = \underset{v}{\operatorname{argmin}}(0,02 - p(v, 370)) = 385$$

Интенсивность трафика в сети передачи данных определяется как

$$a = v \cdot a_0 \text{ бит/с}$$

где a_0 - битовая скорость передачи данных в канале для используемого кодека (бит/с).

Для данных задания получаем

$$a = 385 \cdot 85,6 = 32,956 \text{ Мбит/с}$$

4. Расчет пропускной способности канала

Согласно заданию модель узла может быть описана как СМО М/М/1, тогда время доставки пакета может быть определено как

$$T = \frac{\bar{t}}{1 - \lambda \bar{t}} \text{ с,}$$

где λ - интенсивность пакетов (пакетов/с),

\bar{t} - среднее время передачи пакета по линии связи.

Выразим время доставки через интенсивность трафика a и длину пакетов l , и пропускную способность канала b .

$$\lambda = a/l \text{ пакетов/с.}$$

где l – длина пакета (бит).

$$\bar{t} = \frac{l}{b}$$

где b – пропускная способность канала (бит/с).

Подставляя два последних выражения в формулу для времени доставки и выражая из нее b получим

$$b = a + \frac{l}{T} \text{ бит/с.}$$

Подставляем в последнее выражение полученное значение интенсивности трафика a и заданный норматив на задержку доставки пакета получим

$$b = 32,956 \cdot 10^6 + \frac{200 \cdot 8}{5 \cdot 10^{-3}} = 33276000 \text{ бит/с} = 33,276 \text{ Мбит/с.}$$

5. Результаты расчета

Результаты расчета сведены в таблицу

№	Результат	Ед. измерения	Значение
1	Интенсивность аб. нагрузки	Эрл	370
2	Число потоков VoIP	шт.	385
3	Интенсивность пакетов	пакетов/с	20597,5
4	Интенсивность трафика	Мбит/с	33,0
5	Пропускная способность	Мбит/с	33,3

В результате расчета получено значение пропускной способности канала, при которой выполняются требования к качеству обслуживания.

Цель университета – удовлетворение потребностей личности в интеллектуальном, культурном и нравственном развитии посредством получения образования различных уровней и направленности; удовлетворение потребностей общества и государства в высококвалифицированных кадрах.

КАФЕДРА СЕТЕЙ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ:

<http://www.seti.sut.ru/>

Кафедра сетей связи и передачи данных (СС и ПД) Кафедра сетей связи была образована в 1998 году. В связи с оптимизацией структуры вуза произошло слияние кафедры сетей связи и кафедры многоканальных систем передачи в единую структуру, также было проведено объединение с кафедрой основ передачи дискретных сообщений (ОПДС). Это позволило создать мощное подразделение вуза — кафедру сетей связи и передачи данных — охватывающее вопросы архитектуры, оптимизации и проектирования сетей связи. В настоящее время на кафедре работает 6 докторов наук и 24 кандидата наук.

Среди курсов кафедры особое внимание уделяется вопросам построения сетей связи, студентами изучаются телекоммуникационные технологии, современные методы моделирования, проектирования и расчета сетей, разработке ориентированного на сетевые вопросы программного обеспечения. Курсы постоянно обновляются в соответствии с новейшими разработками лидеров в области телекоммуникаций.

Сегодня на кафедре изучаются принципы построения самоорганизующихся сетей, прогнозы развития Всемирной сети связи в направлении реализации концепции Интернета Вещей, сетей автомобильного транспорта и Интеллектуальной Транспортной Системы, системы e-здоровья, медицинских сетей. Также изучаются сверхплотные сети, сети 4G (частично), 5G.

На кафедре студенты имеют возможность принимать участие в научных конференциях, в том числе и международных, и в научно-исследовательской работе, связанной с проектами для ведущих российских и мировых производителей телекоммуникационного оборудования и операторов связи. Студенты принимают активное участие в международных хакатонах по Интернету Вещей и дополненной реальности, традиционно занимая призовые места.

Выпускники кафедры обладают компетенциями:

-знаниями основ философии и методологии науки и методы научных исследований, методов проектирования распределенных информационных систем, их компонентов и протоколов их взаимодействия, знанием технических характеристик телекоммуникационных систем, нормативных требований;

-умением: формулировать цели и задачи исследования, действовать в нестандартных ситуациях, проектировать системы с параллельной обработкой данных и высокопроизводительные системы, и их компоненты, оценивать технические возможности и выработать рекомендации по построению систем и сетей передачи, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы;

-владением: способностью к саморазвитию и самореализации, способностью к абстрактному мышлению обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию, методами постановки научных экспериментов, способностью проектировать телекоммуникационные системы и проводить анализ проектных решений по обеспечению безопасности телекоммуникационных систем, иностранным языком в научной и деловой сфере, способность производить оценку технических характеристик телекоммуникационных систем.

Трудоустройство выпускников кафедры возможно на любых предприятиях, занимающиеся разработками в сфере телекоммуникаций.

Студенты могут проходить практику в компаниях, занимающихся разработками в сфере телекоммуникаций, в Санкт-Петербурге и зарубежных вузах.

Мы готовим квалифицированных бакалавров и магистров в области инфокоммуникационных технологий с новыми знаниями, образом мышления и способностями быстрой адаптации к современным условиям труда.

Парамонов А.И., Маколкина М.А., Киричѐк Р.В., Выборнова А.И.

**Моделирование и оптимизация в системах и сетях
электросвязи
Раздел Лабораторный практикум
Учебное пособие**

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
СПбГУТ**

197101, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22