

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»

Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

Шагиахметов Д.Р.

«\_\_\_\_\_» январь 2014 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: Исследование сети передачи данных в Атырауской ОДТ по обеспечению качества обслуживания

Выполнил магистрант гр. ИТСП–11–1 \_\_\_\_\_ Букеев А. Е.  
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель к.т.н, доцент \_\_\_\_\_ Есеркегенов А. С.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормаконтроль старший преподаватель \_\_\_\_\_ Абрамкина О.А.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Вычислительная техника старший преподаватель \_\_\_\_\_ Данько Е.Т.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет *Радиотехники и связи*

---

Специальность *6M071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации*

Кафедра *Телекоммуникационных систем*

---

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту *Букееву Ануару Есболовичу*

Тема диссертации «Исследование сети передачи данных в Атырауской ОДТ по обеспечению качества обслуживания»

утверждена Ученым советом университета, Приказ № \_\_\_\_\_ от «\_\_» 201\_\_ г.

Срок сдачи законченной диссертации «\_\_» февраля 2013 г.

Цель исследования: Улучшение обслуживания сетевого трафика.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1 Анализ существующей сети;

2 Математическая модель систем распределения информации;

3 Сервисные модели QoS;

4 Самоподобный трафик;

5 Имитационная модель поступающего пуассоновского простейшего потока на маршрутизатор;

6 Имитационная модель поступающего потока по распределению закона Парето.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): 1 Схема организации сети телекоммуникации Атырауской ОДТ;

2 Схема организации сети Metro Ethernet Атырауской ОДТ;

3 Зависимость среднего времени ожидания в очереди (Ave.time) от загрузки маршрутизатора;

4 Зависимость среднего времени ожидания от самоподобной загрузки;

Рекомендуемая основная литература:

- 1 W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger and D. V. Wilson. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version), IEEE/ACM Transactions in Networking, 2, 1994, 1-15;
- 2 Бельков Д. В. Исследование сетевого трафика // Информатика, кібернетика та обчислювальна техніка ДонНТУ, – Донецк, 2009. – № 10;
- 3 Шелухин О. И., Тенякшев А. М. Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с;
- 4 Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Связь, 1979, – 224с;
- 5 Вентцель Е.С. Теория вероятностей – М.: Наука, 1969. – 576 с.

ГРАФИК  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
1. Анализ существующей сети	09.05.13	
2. Исследование измеренного трафика	13.06.13	
3. Исследование измеренного трафика методом агрегирования	07.09.13	
4. Имитационная модель простейшего потока,		
5. Имитационная модель самоподобного потока	17.10.13	
	07.01.13	

Дата выдачи задания сентябрь 2012 г.

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_   
подпись

Шагиахметов Д.Р.  
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации

\_\_\_\_\_   
подпись

Есеркегенов А. С.  
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант

\_\_\_\_\_   
подпись

Букеев А. Е.  
(Ф.И.О.)

## **Аңдатпа**

Үшінші деңгей жол көрсетуші түсетін торлық құрылғысына зерттелген нақты трафигін ұсынылатын диссертациялық жұмысында және көмегімен Пуассон бойымен тарату заңдарының сәйкестігінде және парето таралған транзактілерді оған жол көрсетушінің портының буферін қызмет етудің тиімділігін зерттеу әсерде өткізілген GPSS World бағдарлама имитациялық үлгілер объектке бағдарлалған жасалған.

## **Аннотация**

В предлагаемой диссертационной работе исследован реальный трафик поступающий на сетевое устройство третьего уровня маршрутизатор и разработаны имитационные модели в объектно-ориентированной программе GPSS World, с помощью которых проведены исследования эффективности функционирования буфера порта маршрутизатора при воздействии на него транзактов, распределенных в соответствии законов распределений по Пуассона и Парето.

## **Abstract**

In the present thesis investigated real traffic coming to a network device in the third level and router simulation models developed in the object-oriented program GPSS World, by which the efficiency of the research conducted buffer router port when exposed to transact distributed according to the Poisson distribution laws and Pareto.

## Введение

Современный этап развития телекоммуникационных технологий характеризуется взрывным ускорением процессов взаимной конвергенции, которые проходят в каждой из специализированных инфраструктур.

В Казахстане всеми операторами связи проводятся работы по решению концепции NGN (Next Generation Network) то есть созданию универсальной сети связи следующего поколения, обеспечивающей предоставление неограниченного набора услуг с гибкими настройками по их управлению, персонализации, созданию новых услуг за счет унификации сетевых решений. Концепция и архитектура NGN обеспечивает переход на IP-стандарт и рост доходов за счет предоставления новых услуг.

Основное отличие сетей следующего поколения от традиционных сетей в том, что вся информация, циркулирующая в сети, разбита на две составляющие. Это сигнальная информация, обеспечивающая коммутацию абонентов и предоставление услуг, и непосредственно пользовательские данные, содержащие полезную нагрузку, предназначенную абоненту (голос, видео, данные). Пути прохождения сигнальных сообщений и пользовательской нагрузки могут не совпадать. На сегодняшний день, основным устройством для голосовых услуг в сетях NGN является Softswitch (программный коммутатор), который управляет VoIP сессиями. Также немаловажной функцией программного коммутатора является связь сетей следующего поколения NGN с существующими традиционными сетями СТОП, посредством сигнального- и медиа-шлюзов, которые могут быть выполнены в одном устройстве.

Проблема перехода от традиционных сетей с коммутацией каналов к сетям с коммутацией пакетов (NGN) является одной из наиболее актуальных для операторов связи. Перспективные разработки в области IP-коммуникаций связаны с созданием комплексных решений, позволяющих при развитии сетей следующего поколения сохранять существующие подключения и обеспечить бесперебойную работу в любой сети: на инфраструктуре медных пар, по оптическим каналам, на беспроводной (WiMAX, WiFi) и проводной (ETTH, PLC и т. д.) сети.

Основное отличие NGN-сетей от сетей старого поколения заключается в том, что деление между транспортным уровнем и уровнем предоставления услуг становится скорее логическим, нежели физическим. Потому что NGN-сеть подразумевает легкий и быстрый запуск новых услуг. Именно в этом и заинтересованы операторы связи - не в построении транспорта для каждой новой услуги, а в быстром развертывании услуг на базе современных платформ.

Компонентами сети NGN являются:

- универсальная транспортная сеть, которая включает IP-ядро сети и сети доступа, использующие разные технологии;
- система предоставления сервисов;

- система учета абонентов, биллинговая система;
- системы управления сетью.

Следовательно, при этом все информационные потоки интегрируются в единую сеть.

Концепция мультисервисности содержит несколько аспектов, относящихся к различным сторонам построения сети:

- конвергенция загрузки сети, определяющая передачу различных типов трафика в рамках единого формата представления данных, которая определяет тенденцию использования сетей с коммутацией пакетов для передачи и аудио- и видеопотоков, и собственно данных сетей;

- конвергенция протоколов, определяющая переход от множества существующих сетевых протоколов к общему (как правило, IP) и при этом мультисервисные сети ориентируются на единый протокол и различные сервисы, требующиеся для поддержки различных типов трафика;

- физическая конвергенция, определяющая передачу различных типов трафика в рамках единой сетевой инфраструктуры, то есть и мультимедийный, и голосовой трафики могут быть переданы с использованием одного и того же оборудования с учетом различных требований к полосе пропускания, задержкам и «дрожанию» частоты;

- конвергенция устройств, определяющая тенденцию построения архитектуры сетевых устройств, способной в рамках единой системы поддерживать разнотипный трафик. Так, коммутатор поддерживает коммутацию Ethernet-пакетов, IP-маршрутизацию и соединения АТМ. Устройства сети могут обрабатывать данные, передаваемые в соответствии с общим протоколом сети (например, IP) и имеющие различные сервисные требования (например, гарантии ширины полосы пропускания, задержку и др.);

- конвергенция приложений, определяющая интеграцию различных функций в рамках единого программного средства (например, Web-браузер позволяет объединить в рамках одной страницы мультимедиа-данные типа звукового, видеосигнала, графики высокого разрешения и др.);

- конвергенция технологий выражает стремление к созданию единой общей технологической базы для построения сетей связи, способной удовлетворить требованиям и региональных сетей связи, и локальных вычислительных сетей;

- организационная конвергенция, предполагающая централизацию служб сетевых, телекоммуникационных, информационных под управлением менеджеров высшего звена. Это обеспечивает необходимые организаторские предпосылки для интегрирования голоса, видеосигнала и данных в единой сети.

Все перечисленные аспекты определяют различные стороны проблемы построения мультисервисных сетей, способных передавать трафик различного типа, как в периферийной части сети, так и в ее ядре.

Мультисервисная сеть передачи данных предполагает современный подход к организации связи. Единая сеть обеспечит работу прикладных задач,

предоставление внутриведомственной телефонной связи и видеоконференцсвязи, среду для работы приложений дистанционного обучения служащих, решит задачи автоматизации обработки обращений граждан или потребителей услуг. Сеть предоставит возможность разделения и изоляции информационных потоков различных ведомств, подразделений учреждений.

Следовательно, с каждым годом сетевые приложения требуют для своей работы все большей полосы пропускания и меньших временных задержек и поддержка качества обслуживания (QoS) опорной IP-сетью является важной задачей.

Переход к системам пакетной передачи демонстрирует, что применяемые методы расчета в традиционной телефонии не подходят для случая коммутации пакетов. Особую значимость для проектирования речевых и видео сервисов имеют адекватные модели трафика как отдельного источника, так и мультиплексированных потоков.

Последние исследования показывают, что телекоммуникационный трафик для большинства видов сервисов является самоподобным (фрактальным). Пакетизированная передача различных видов информации потребовала пересмотра многих задач теории телетрафика, связанных с описанием потоков и расчетом нагрузок на сеть в связи с проявлением свойств самоподобия в сетевом трафике. Пачечный характер трафика создает сложные условия функционирования сетевых структур, находящихся под его воздействием. Это вызвано тем, что как длина пачек, так и паузы между ними изменяются в широких пределах временных интервалов.

Для оценки и описания пульсирующей структуры или изменчивости (самоподобности) процессов в городе Атырау анализатором трафика Wireshark измерен магистральный трафик.

Далее в целях оценки влияния поступающего простейшего и самоподобного трафика данных разработаны имитационные модели на моделируемом языке GPSS World.

## **Содержание**

Введение	9
1 Анализ существующей сети	12
1.1 Общие сведения о сети телекоммуникации Атырауской ОДТ	12
1.2 Современное состояние развития телекоммуникационных сетей	14
1.3 Математическая модель систем распределения информации	17
1.4 Основные понятия теории самоподобного телетрафика	20
1.5 Пульсирующая структура трафика и ее описание	22
1.6 Маршрутизатор	24
1.7 Требования к качеству обслуживания приложений разных типов	27
1.8 Качество обслуживания мультисервисной сети	31
1.9 Сервисные модели QoS	35
1.10 Имитационное моделирование на GPSS	40
1.11 Цель исследования и постановка основных задач	40
1.12 Выводы по первой главе	41
2 Самоподобный трафик	42
2.1 Основные понятия теории фракталов	42
2.2 Самоподобие в системах массового обслуживания	43
2.3 Основные свойства самоподобных процессов	49
2.4 Описание модели самоподобного потока	52
2.5 Выводы по второй главе	54
3 Исследование трафика	55
3.1 Классификация трафика в сетях телекоммуникаций	55
3.2 Характеристики простейшего потока событий	56
3.3 Потoki пакетов в мультисервисных сетях	57
3.4 Исследование сетевого трафика	60
3.5 Оценка статистических характеристик сетевого трафика	62
3.6 Исследование трафика на самоподобие методом агрегирования	63
3.7 Выводы по третьей главе	67
4 Моделирование в среде GPSS World	68
4 Моделирование поступающего сетевого потока на GPSS World	68
4.1 Имитационная модель	68
4.2 Имитационная модель поступающего пуассоновского простейшего потока на маршрутизатор	70
4.3 Итоги результатов моделирования	73
4.4 Имитационная модель поступающего потока по распределению закона Парето	74
4.5 Итоги результатов моделирования	75
4.6 Выводы по четвертой главе	77
Заключение	78
Перечень сокращений	79
Список литературы	81
Приложение А	84



Приложение Б	85
Приложение В	86
Приложение Г	87

## 1. Анализ существующей сети

### 1.1 Общие сведения о сети телекоммуникации Атырауской ОДТ

Атырау расположен в Западной Казахстане и является областным центром Атырауской области, крупнейший центр по добыче нефти и газа, перспективный рынок инвестиций.

Сеть телекоммуникаций Атырауского ОДТ имеет современную инфраструктуру связи. Это оптическая магистраль до 189 Мбит/с, широкая абонентская база, нацеленность на внедрение инновационных технологий. Большое внимание уделяется повышению конкурентоспособности путем расширения спектра предоставляемых услуг и значительного улучшения качества обслуживания клиентов. С завершением в 2008 году строительства Западной ВОЛС в Атырауском ОДТ пользователи четырех 4 областных центров и 29 населенных пунктов получили возможность пользоваться всеми видами высококачественных телекоммуникационных услуг (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема организации сети телекоммуникации Атырауской ОДТ

Введен в опытную эксплуатацию Call-center в Атырау. Это передовое и эффективное техническое решение в организации справочных служб, которое позволяет расширить спектр предоставляемых услуг и повысить качество обслуживания клиентов. Доля на рынке передачи данных и Internet составляет более 55%. Национальная сеть передачи данных (ISP) работает в конкурентной среде под торговой маркой Kazakhstan Online. Применение технологии ATM

позволяет предоставлять услуги доступа к сервисам Интернет на высокой скорости.

Национальная сеть передачи данных предоставляет такие услуги, как доступ по коммутируемой сети СТОП «Зона Интернет», выделенное подключение через ADSL, HDSL, IP over FR, доступ к частным корпоративным сетям по VPDN, предоставление услуг приложений Web-Hosting и т.д. По услуге коммутируемого доступа (Зона Интернет, Казахстанский Интернет и VPDN) емкость модемного пула увеличена до 3240 портов. По услуге ADSL емкость увеличена до 2500 портов.

В 2012 году было смонтировано и принято в эксплуатацию 8 новых узлов передачи данных. Завершена реализация проекта перевода всех серверов доступа к услугам «Зона Интернет», «Казахстанский Интернет», перевод работы VPDN с сигнализации R2 на сигнализацию ОКС №7.

Все абоненты 137 населенных пунктов пользуются услугой Интернет ШПД, количество пользователей 60360 абонентов, в том числе по CDMA EV DO-45 подключены 227 абонентов, проникновение Интернета на 100 домохозяйств составляет – 43 точки. До всех районных центров организованы GE потоки. В населенных пунктах, где количества населения более 50 человек, телефонизация организована по сети WLL CDMA. На рисунке 1.2 представлена схема организации сети Metro Ethernet Атырауской ОДТ, которая представляет собой полностью оптическую сеть.

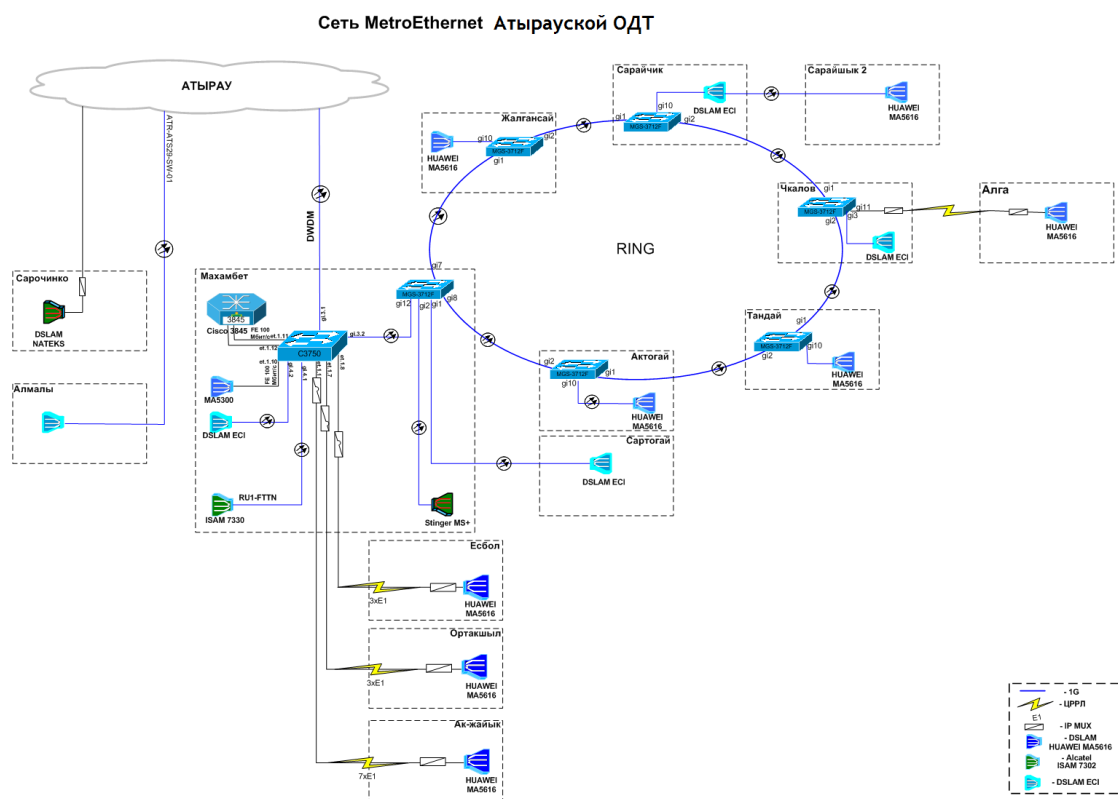


Рисунок 1.2 – Схема организации сети Metro Ethernet Атырауской ОДТ

В городах Атырау и Кульсары организована сеть оптического абонентского доступа по технологии FTTH (GPON). По Атырауской области количество абонентов FTTH составляет - 11648.

Технология Metro Ethernet Атырауской ОДТ объединяет в оптическое кольцо населенные пункты: Жалгансай, Актогай, Сартогай, Тандай, Чкалов, Алга, Сарайчик, Сарайшык 2 и Махамбет.

В городе Атырау функционирует главное кольцо сети передачи данных 10 Gigabit Ethernet и четыре второстепенных кольца Gigabit Ethernet через ОПТС (опорно-транзитные станции) подключенные к главному кольцу. На рисунке 1.3 представлена топологическая схема сети передачи данных города г. Атырау.

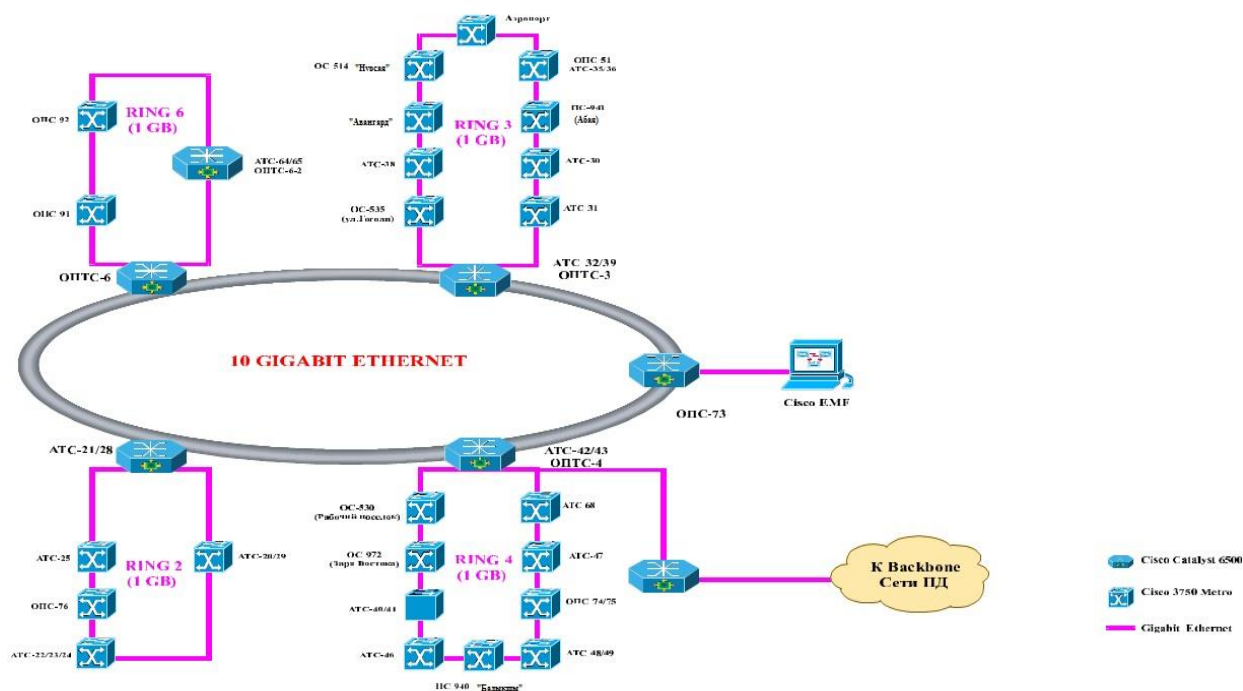


Рисунок 1.3 – Схема сети передачи данных г. Атырау

Услугами предоставления Интернет населению в Атырау занимаются провайдеры «Казахтелеком», Veeline и Теле2. Популярной услугой является широкополосный доступ Интернет под брендом ID Net (более 12000 абонентов). До конца 2015 года эта услуга будет доступна всем абонентам областного центра [1].

## 1.2 Современное состояние развития телекоммуникационных сетей

Мультисервисная сеть – это единая сеть, способная передавать голос, видеоизображения и данные. Появление мультисервисных сетей может оказать

решающее влияние на пути развития индустрии телекоммуникаций и передачи данных.

В Атырауском ОДТ осуществляется доставка по единой сетевой инфраструктуре, базирующейся на коммутации пакетов разнородного трафика такие как данные, голос и видео.

Строительство мультисервисных сетей связано с темпами роста трафика данных несоизмеримо превышающего голосовой трафик (рисунок 1.4). Здесь избран путь – постепенной замены TDM-сетей с коммутацией каналов на инфраструктуру пакетных сетей [2].

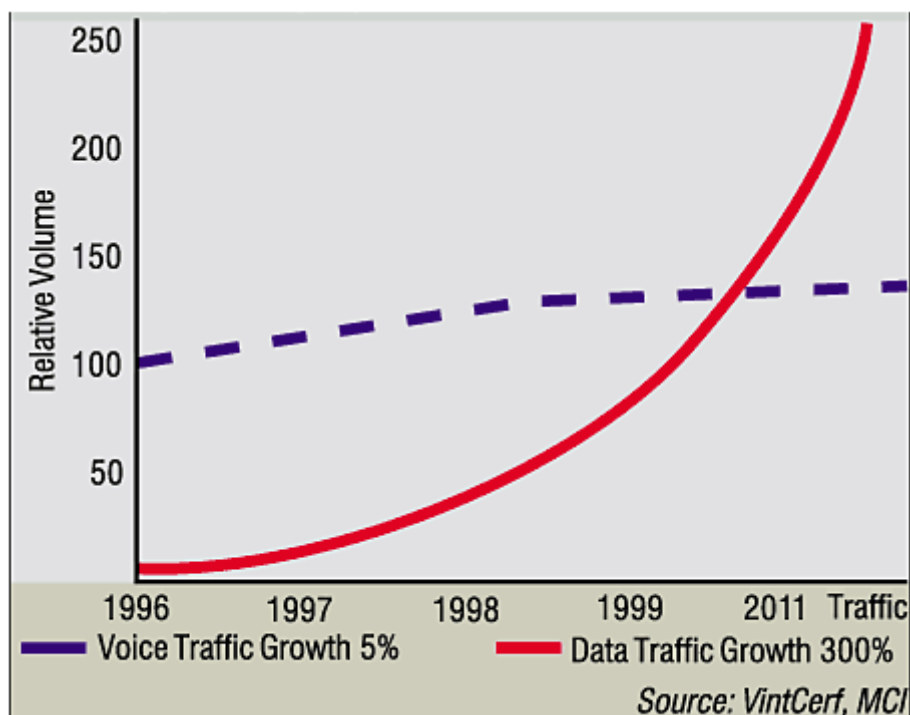


Рисунок 1.4 – Сравнительный график роста трафика данных и голоса

Трафики данных и голоса имеют столь разные особенности, что их трудно примирить в единой сети. У первого непредсказуемый взрывной характер, он поглощает почти все наличные ресурсы сети в случайные короткие отрезки времени, в то время как второй предсказуем и требует устойчивой передачи из конца в конец с малым временем ожидания.

Концепция мультисервисности содержит несколько аспектов, относящихся к различным сторонам построения сети [3]:

- конвергенция загрузки сети, определяющая передачу различных типов трафика в рамках единого формата представления данных. Например, в настоящее время передача аудио- и видеотрафика происходит в основном через сети, ориентированные на коммутацию каналов, а передача данных — по сетям с коммутацией пакетов. Конвергенция загрузки сети определяет тенденцию использования сетей с коммутацией пакетов для передачи и аудио- и видеопотоков, и собственно данных сетей. Однако это не отрицает

требования дифференцирования трафика в соответствии с предоставляемым качеством услуг;

- конвергенция протоколов, определяющая переход от множества существующих сетевых протоколов к общему (как правило, IP). В то время как существующие сети предназначены для управления множеством протоколов, таких как IP, IPX, AppleTalk, и одного типа данных, мультисервисные сети ориентируются на единый протокол и различные сервисы, требующиеся для поддержки различных типов трафика;

- физическая конвергенция, определяющая передачу различных типов трафика в рамках единой сетевой инфраструктуры. И мультимедийный, и голосовой трафики могут быть переданы с использованием одного и того же оборудования с учетом различных требований к полосе пропускания, задержкам и «дрожанию» частоты. Протоколы резервирования ресурса, формирования приоритетных очередей и качества обслуживания (QoS) позволяют дифференцировать услуги, предоставляемые для различных видов трафика;

- конвергенция устройств, определяющая тенденцию построения архитектуры сетевых устройств, способной в рамках единой системы поддерживать разнотипный трафик. Так, коммутатор поддерживает коммутацию Ethernet-пакетов, IP-маршрутизацию и соединения ATM. Устройства сети могут обрабатывать данные, передаваемые в соответствии с общим протоколом сети (например, IP) и имеющие различные сервисные требования (например, гарантии ширины полосы пропускания, задержку и др.). Кроме того, устройства могут поддерживать как Web-ориентированные приложения, так и пакетную телефонию;

- конвергенция приложений, определяющая интеграцию различных функций в рамках единого программного средства. Например, Web-браузер позволяет объединить в рамках одной страницы мультимедиа-данные типа звукового, видеосигнала, графики высокого разрешения и др.;

- конвергенция технологий выражает стремление к созданию единой общей технологической базы для построения сетей связи, способной удовлетворить требованиям и региональных сетей связи, и локальных вычислительных сетей. Такая база уже существует: например, асинхронная система передачи (ATM) может использоваться для построения как региональных, так и локальных вычислительных сетей;

- организационная конвергенция, предполагающая централизацию служб сетевых, телекоммуникационных, информационных под управлением менеджеров высшего звена, например, в лице вице-президента. Это обеспечивает необходимые организаторские предпосылки для интегрирования голоса, видеосигнала и данных в единой сети.

Все перечисленные аспекты определяют различные стороны проблемы построения мультисервисных сетей, способных передавать трафик различного типа как в периферийной части сети, так и в ее ядре.

### 1.3 Математическая модель систем распределения информации

Теория массового обслуживания описывает математические методы оценки качества обслуживания. Появилась в начале XX века с появлением телефонных систем. Используется во многих сферах. Широкое использование получила в системах связи (теория телетрафика).

Телетрафик – это понятие, которое можно определить как движение информационных потоков в информационных системах. Теория телетрафика изучает закономерности и количественное описание информационных потоков [4].

Теория телетрафика применяется в системах и сетях передачи данных и телефонных сообщений. Она занимается построением математических моделей, отображающих реальные процессы в системах распределения информации и разработкой методов оценки качества их функционирования. Теория телетрафика оперирует не с самими системами распределения информации, а с их математическими моделями [5].

Основной математической моделью процессов, описывающих трафик в телекоммуникационных сетях, является случайный поток данных.

Поток как случайный процесс характеризуется своими статистическими свойствами. Чаще всего используются: плотность вероятности поступления данных за период, плотность вероятности интервалов между поступлениями данных и автокорреляционная функция [6].

Математическая модель системы распределения информации включает следующие три основных элемента:

- поток поступающих сообщений (требований на обслуживание);
- система обслуживания поступающих сообщений (система коммутации);
- дисциплину обслуживания поступающих сообщений.

Поток сообщений включает информацию о параметрах и свойствах потока вызовов (требований на обслуживание), а также о виде передаваемых сообщений и форме их представления.

Система обслуживания характеризуется структурой построения и набором структурных параметров (количество входов, количество выходов и др.).

Дисциплина обслуживания поступающих сообщений характеризуется:

- способом обслуживания (с ожиданием, без потерь, с явными потерями, с повторением или комбинированный);
- порядком обслуживания (в порядке очередности, в случайном порядке или с приоритетом);
- способом исчисления свободных выходов (упорядоченный или случайный).

Традиционно проблему управления потоками в сетях передачи данных до сих пор решается с помощью математического аппарата теории массового обслуживания, теории графов, теории сетей, теории автоматов и др.

Ведущую роль в постановке и решении классических проблем теории очередей наряду с первыми исследованиями А.К. Эрланга сыграли работы Т.О. Энгсета, А.Я. Хинчина, К. Пальма и др.

В теории массового обслуживания вводится в рассмотрение модель потока событий. Поток событий называется последовательность событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ . Потоки событий, происходящих в случайные моменты времени  $t_1, t_2 > t_1, \dots, t_n > t_{n-1}, \dots$  являются случайными процессами.

В реальных СМО поток заявок обычно является случайным. Такие потоки характеризуются следующими тремя свойствами:

- поток событий называется стационарным, если вероятность поступления  $K$  требований за промежуток времени  $[t_0; t_0 + \Delta t)$  не зависит от  $t_0$ , а зависит лишь от длины интервала  $\Delta t$ :  $P(\Delta t) = const$  при  $\Delta t = const$ . Или:  $P_k(t_0, t_0 + \Delta t) = const$  при  $\Delta t = const$  (рисунок 1.5). Или, стационарность означает неизменность вероятностного режима поведения случайной величины по времени. Стационарность означает постоянство во времени плотности поступления вызовов, то есть постоянство среднего числа вызовов в единицу времени.

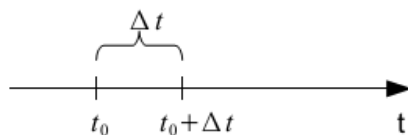


Рисунок 1.5 – Пояснение стационарности

Интенсивность (плотность) потока событий – среднее число событий в единицу времени – для стационарного потока должна оставаться постоянной. Пульсации стационарного потока не носят закономерного характера, а усредненное число событий, попадающих на единичный участок времени, остается постоянным для всего рассматриваемого периода;

- поток событий называется ординарным, если вероятность попадания на малый интервал времени  $\Delta t$  двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события. Это означает, что в ординарном потоке заявки приходят, как правило, поодиночке, а не парами, тройками и т.д. Ординарность – бесконечно малая вероятность поступления более одного события за бесконечно малый интервал времени;

- отсутствие последствия предполагает, что вероятность поступления  $K$  требований в интервал времени  $[t_0; t_0 + \Delta t)$  не зависит от того, сколько требований и как эти требования поступали до момента  $t_0$ :  $P_k(t_0, t_0 + \Delta t)$ . Степень



последствия – уровень зависимости вероятности поступления событий от предыдущих.

Если поток событий обладает тремя названными свойствами, то он называется простейшим (или стационарным пуассоновским) потоком. При суммировании (взаимном наложении) большого числа ординарных, стационарных потоков с последствием получается поток близкий к простейшему [6].

Классической моделью трафика в информационных сетях является Пуассоновский (простейший) поток. Он характеризуется набором вероятностей  $P(k)$  поступления  $k$  сообщений за временной интервал  $t$  [4, 7]:

$$P(k) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad (1.1)$$

где  $k=0,1,\dots$  – число сообщений;

$\lambda$  – интенсивность потока.

При этом интервал времени измерения количества сообщений  $t$  и интенсивность потока  $\lambda$  являются постоянными величинами.

Математическое ожидание (среднее) и дисперсия Пуассоновского потока равны  $\lambda$ .

Зная вероятность поступления данных за период, можно получить распределение интервала  $\tau$  между соседними событиями:

$$P(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \tau}. \quad (1.2)$$

Отсюда вывод: пуассоновский поток характеризуется экспоненциальным распределением интервалов между событиями.

Для случайной величины  $\tau$ , имеющей показательное распределение, математическое ожидание  $m_r$  есть величина, обратная параметру, а среднее квадратичное отклонение  $\sigma_r$  равно математическому ожиданию:

$$m_r = \sigma_r = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.3)$$

Основным свойством пуассоновского потока, обуславливающим его широкое применение при моделировании, является аддитивность: результирующий поток суммы пуассоновских потоков тоже является пуассоновским с суммарной интенсивностью. При моделировании Пуассоновский поток можно получить мультиплексированием совокупности ON/OFF источников, которые называются Марковскими процессами Долгое время считалось, что природа сетевого трафика соответствует Пуассоновскому процессу. А это означало, что на вход

устройства поступает пуассоновский поток заявок, то есть является простейшим – однородный стационарный поток без последствий.

Следовательно, до недавнего времени теоретическую базу для проектирования систем распределения информации составляла теория массового обслуживания. Она адекватно описывает процессы, происходящие в сетях коммутации каналов. Моделью потока вызовов (данных) в этой теории является простейший поток (стационарный ординарный поток без последствия).

Развитие высоких технологий привело к широкому распространению сетей с пакетной передачей данных, которые постепенно стали вытеснять системы с коммутацией каналов, но, по-прежнему, они проектировались на основе общих положений теории телетрафика.

Поток как случайный процесс характеризуется своими статистическими свойствами. Чаще всего используются: плотность вероятности поступления данных за период, плотность вероятности интервалов между поступлениями данных и автокорреляционная функция.

#### **1.4 Основные понятия теории самоподобного телетрафика**

Сегодня происходит серьезное изменение структуры и характера информации, передаваемой в телекоммуникационных сетях как корпоративного уровня, так и уровня операторов связи. Главным поставщиком данных становится Интернет, сервисы которого пользуются все возрастающим спросом. Меняются подходы к построению сетей, и на первый план выходят сети нового поколения, так называемые мультисервисные сети. Главными характеристиками таких сетей являются возможность с одинаковым качеством передавать любые виды трафика, широкая полоса пропускания, пакетная коммутация и управляемость.

Основная задача мультисервисных сетей заключается в обеспечении взаимодействия разных коммуникационных подсистем, чтобы для передачи голоса, данных и видео использовалась единая инфраструктура.

Впервые о самоподобном телетрафике заговорили с момента его открытия в 1993 году группой американских исследователей W.Leland, M.Taqqu, W.Willinger и D.Wilson [8], которые исследовали Ethernet-трафик в сети корпорации Bellcore и обнаружили, что на больших масштабах он обладает свойством самоподобия, то есть выглядит качественно одинаково при любых (достаточно больших) масштабах временной оси. И, что потоки в современных сетях нельзя аппроксимировать простейшими, поскольку они имеют иную структуру, чем принято в классической теории телетрафика [9, 10]. Было установлено, что трафик сети обладает свойством самоподобия (масштабной инвариантности), имеет память (последствие), а также обладает высокой пульсацией. По этой причине расчет параметров системы

распределения информации, предназначенной для обработки сетевого трафика, по классическим формулам дает некорректные, неоправданно оптимистические результаты. Алгоритмы обработки трафика, созданные для работы с простейшим потоком неэффективны для фрактальных потоков с самоподобием. Статистические характеристики (среднее значение, спектральная плотность, автокорреляционная функция и др.) самоподобного трафика имеют характер спада сильно отличающийся от экспоненциального. Поэтому требуют корректировки исходные предпосылки, которые делались ранее при разработке многих сетевых устройств.

То есть, оказывается, что в условиях самоподобного трафика, методы расчета компьютерной сети (пропускной способности каналов, емкости буферов и пр.) основанные на марковских моделях и формулах Эрланга, которые с успехом используются при проектировании телефонных сетей, дают неоправданно оптимистические решения и приводят к недооценке нагрузки.

Проблеме исследования различных типов сетевого трафика на самоподобие посвящено много работ (Д.В. Ландэ, О.И. Шелухина, Г.А. Урьева, А.В. Осина, В.В. Петрова и др.

В этих работах доказывают то, что сетевой трафик является самоподобным (self-similar) или фрактальным (fractal) по своей природе, то есть в нем присутствуют так называемые вспышки или пачки (burst) данных, наблюдаемые в различных временных интервалах (от миллисекунд до минут или даже часов) и корреляция между пакетами.

Неформально самоподобный процесс определяется как случайный процесс, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабирования.

В отличие от пуассоновских процессов самоподобные характеризуются наличием последствия: вероятность поступления следующего (очередного) события зависит не только от времени, но и от предыдущих событий (предыстории). Это означает, что число текущих событий может зависеть от числа предыдущих событий в отдаленные промежутки времени.

Непрерывный стохастический процесс  $X(t)$ , считается статистически самоподобным с параметром  $H$  ( $0,5 \leq H \leq 1$ ), если для любого положительного числа  $a$ , процессы  $X(t)$  и  $a^{-H} X(at)$  будут иметь идентичные распределения, то есть иметь одинаковые статистические свойства для всех положительных целых  $n$

$$\{X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)\}^D \sim \{a^{-H} X(at_1), a^{-H} X(at_2), \dots, a^{-H} X(at_n)\}. \quad (1.4)$$

Практически статистическая самоподобность подразумевает, что выполняются следующие условия [11, 12, 13]:

$$\text{- среднее } E[X(t)] = \frac{E[X(at)]}{a^H}; \quad (1.5)$$

$$\text{- дисперсия } V_{ar}[X(t)] = \frac{V_{ar}[X(at)]}{a^{2H}}; \quad (1.6)$$

$$\text{- функция автокорреляции } R(t, \tau) = \frac{R(at, a\tau)}{a^H}. \quad (1.7)$$

где  $H$  – параметр Херста (Hurst);  
 $a$  – положительное число.

Параметр Херста показывает «степень» самоподобности. Значение  $H = 0.5$  показывает отсутствие самоподобности, а большие значения  $H$  (близкие к 1) показывают большую степень самоподобности или длительно-зависимости (long-range dependent, LRD) в процессе. Это обозначает, что если LRD процесс имеет тенденцию к увеличению (или уменьшению) в прошлом, то с большой вероятностью он будет иметь тенденцию к увеличению (или уменьшению) в будущем.

## 1.5 Пульсирующая структура трафика и ее описание

Трафик вычислительных сетей имеет ярко выраженный асинхронный и пульсирующий характер. Компьютер посылает пакеты в сеть в случайные моменты времени, по мере возникновения в этом необходимости. При этом интенсивность посылки пакетов в сеть и их размер могут изменяться в широких пределах – например, коэффициент пульсаций трафика (отношения максимальной мгновенной интенсивности трафика к его средней интенсивности) протоколов без установления соединений может достигать до 200, а протоколов с установлением соединений – до 20. Чувствительность компьютерного трафика к потерям данных высокая, так как без утраченных данных обойтись нельзя и их необходимо восстановить за счет повторной передачи [14, 15, 16, 17].

Пакеты поступают в сеть без предварительного резервирования линий связи и не с фиксированной наперед заданной скоростью, как это делается в сетях с коммутацией каналов, а в том темпе, в котором их генерирует источник. Предполагается, что сеть с коммутацией пакетов в отличие от сети с коммутацией каналов всегда готова принять пакет от конечного узла.

Процедура резервирования пропускной способности может применяться и в пакетных сетях. Однако основная идея такого резервирования принципиально отличается от идеи резервирования пропускной способности в сетях с коммутацией каналов. Разница заключается в том, что пропускная способность канала сети с коммутацией пакетов может динамически

перераспределяться между информационными потоками в зависимости от текущих потребностей каждого потока, чего не может обеспечить техника коммутации каналов.

Коммутация пакетов – это техника коммутации, которая была специально разработана для эффективной передачи компьютерного трафика. Эксперименты по созданию первых компьютерных сетей на основе техники коммутации каналов показали, что этот вид коммутации не позволяет достичь высокой общей пропускной способности сети. Суть проблемы заключается в пульсирующем характере трафика, который генерируют типичные сетевые приложения. Например, при обращении к удаленному файловому серверу пользователь сначала просматривает содержимое каталога этого сервера, что порождает передачу небольшого объема данных. Затем он открывает требуемый файл в текстовом редакторе, и эта операция может создать достаточно интенсивный обмен данными, особенно если файл содержит объемные графические включения. После отображения нескольких страниц файла пользователь некоторое время работает с ними локально, что вообще не требует передачи данных по сети, а затем возвращает модифицированные копии страниц на сервер – и это снова порождает интенсивную передачу данных по сети.

Коэффициент пульсации трафика отдельного пользователя сети, равный отношению средней интенсивности обмена данными к максимально возможной, может составлять 1:50 или 1:100 [18].

При коммутации пакетов все передаваемые пользователем сети сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые пакетами. Сообщение – логически завершенная порция данных – запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл, и т. п. Сообщения могут иметь произвольную длину, от нескольких байт до многих мегабайт. Напротив, пакеты обычно тоже могут иметь переменную длину, но в узких пределах, например от 46 до 1500 байт. Каждый пакет снабжается заголовком, в котором указывается адресная информация, необходимая для доставки пакета узлу назначения, а также номер пакета, который будет использоваться узлом назначения для сборки сообщения. Пакеты транспортируются в сети как независимые информационные блоки.

Сеть с коммутацией пакетов замедляет процесс взаимодействия конкретной пары абонентов, так как их пакеты могут ожидать в сетевых устройствах, пока по магистральным связям передаются другие пакеты, пришедшие в сетевое устройство ранее.

Общий объем передаваемых сетью компьютерных данных в единицу времени при технике коммутации пакетов будет выше, чем при технике коммутации каналов. Это происходит потому, что пульсации отдельных абонентов в соответствии с законом больших чисел распределяются во времени.

Многочисленные измерения трафиковых трасс отмечают тот факт, что такая пульсирующая структура является не отдельным, побочным явлением, а характерной особенностью пакетных сетей.

При пакетной коммутации непрерывный битовый поток с переменной скоростью передачи преобразуется в поток пакетов, при этом плотности распределения длительности интервала времени между поступающими пакетами однозначно определяют его статистические свойства и являются распределениями с «тяжелыми» хвостами».

## 1.6 Маршрутизатор

Маршрутизатор (router) – сетевое устройство, на основании информации о топологии сети и определённых правил принимающее решения о пересылке пакетов сетевого уровня модели OSI между различными сегментами сети.

Работает на третьем уровне и является более совершенным по своей функциональности, чем сетевой мост. Обычно маршрутизатор использует адрес получателя, указанный в пакетах данных и определяет по таблице маршрутизации путь, по которому следует передать данные. Если в таблице маршрутизации для адреса нет описанного маршрута, пакет отбрасывается.

Существуют и другие способы определения маршрута пересылки пакетов, когда, например, используется адрес отправителя, используемые протоколы верхних уровней и другая информация, содержащаяся в заголовках пакетов сетевого уровня. Нередко маршрутизаторы могут осуществлять трансляцию адресов отправителя и получателя, фильтрацию транзитного потока данных на основе определенных правил с целью ограничения доступа, шифрование/дешифрование передаваемых данных.

Таблица маршрутизации содержит информацию, на основе которой маршрутизатор принимает решение о дальнейшей пересылке пакетов. Таблица состоит из некоторого числа записей — маршрутов, в каждой из которых содержится адрес сети получателя, адрес следующего узла, которому следует передавать пакеты и некоторый вес записи — метрика. Метрики записей в таблице играют роль в вычислении кратчайших маршрутов к различным получателям. В зависимости от модели маршрутизатора и используемых протоколов маршрутизации, в таблице может содержаться некоторая дополнительная служебная информация [19, 20]. Таблица маршрутизации может составляться двумя способами:

- статическая маршрутизация – когда записи в таблице вводятся и изменяются вручную. Такой способ требует вмешательства администратора каждый раз, когда происходят изменения в топологии сети. С другой стороны, он является наиболее стабильным и требующим минимума аппаратных ресурсов маршрутизатора для обслуживания таблицы;

- динамическая маршрутизация – когда записи в таблице обновляются автоматически при помощи одного или нескольких протоколов маршрутизации – RIP, OSPF, EIGRP, IS-IS, BGP, и др.

Маршрутизатор строит таблицу оптимальных путей к сетям назначения на основе различных критериев – количества промежуточных узлов, пропускной способности каналов, задержки передачи данных и т. п. Критерии вычисления оптимальных маршрутов чаще всего зависят от протокола маршрутизации, а также задаются конфигурацией маршрутизатора. Такой способ построения таблицы позволяет автоматически держать таблицу маршрутизации в актуальном состоянии и вычислять оптимальные маршруты на основе текущей топологии сети. Однако динамическая маршрутизация оказывает дополнительную нагрузку на устройства, а высокая нестабильность сети может приводить к ситуациям, когда маршрутизаторы не успевают синхронизировать свои таблицы, что приводит к противоречивым сведениям о топологии сети в различных ее частях и потере передаваемых данных.

Маршрутизаторы помогают уменьшить загрузку сети, благодаря ее разделению на домены коллизий и широковещательные домены, а также благодаря фильтрации пакетов. В основном их применяют для объединения сетей разных типов, зачастую несовместимых по архитектуре и протоколам, например для объединения локальных сетей Ethernet и WAN-соединений, использующих протоколы DSL, PPP, ATM, Frame relay и т. д. Нередко маршрутизатор используется для обеспечения доступа из локальной сети в глобальную сеть Интернет, осуществляя функции трансляции адресов и межсетевого экрана. В качестве маршрутизатора может выступать как специализированное (аппаратное) устройство, так и обычный компьютер, выполняющий функции роутера. Существует несколько пакетов ПО (в основном на основе ядра Linux) с помощью которого можно превратить ПК в высокопроизводительный и многофункциональный маршрутизатор, например GNU Zebra. Маршрутизаторы одновременно и просты и сложны.

Одно из основных отличий между маршрутизатором и любым другим коммутатором сообщений состоит в способе построения таблиц. Маршрутизаторы посылают сообщения сетям, в то время как таблицы мостов и коммутаторов содержат список адресов подуровня MAC. Маршрутизатор выполняет две основные функции: переключение трафика и обслуживание среды, в которой он работает. Обе функции можно реализовать на одном и том же процессоре, но не обязательно. Зачастую переключение трафика осуществляет отдельный интерфейсный процессор или процедура обработки прерываний ядра, в то время как процесс обслуживания среды выполняется в фоновом режиме. Качество работы IP-сетей в значительной степени определяется эффективностью схем маршрутизации. Разработка таких схем и управление ими – сложная задача, поскольку приходится учитывать и топологию сети, и параметры каналов связи, и существенные различия в обработке разных типов трафика. Сложность возрастает еще и потому, что все эти параметры динамически меняются во времени из-за изменения нагрузки на

сеть, возможного выхода из строя оборудования и множества других факторов. Ошибки в схеме маршрутизации могут снизить производительность, надежность и живучесть сети, даже если ее технические элементы будут исправны. На рисунке 1.6 представлена функциональная модель маршрутизатора.



Рисунок 1.6 – Функциональная модель маршрутизатора

Уровень маршрутизации, представляет собою часть маршрутизатора, предназначенную для обслуживания среды. Маршрутизатор выполняет целый ряд приложений, причем они могут быть частью сетевой архитектуры или конфигурироваться для удобства администратором сети. Эти приложения, или процессы, выполняются на уровне приложений маршрутизации (Routing Application). Один из таких процессов – доменная служба имен (Domain Name Service, DNS): он кэширует информацию о DNS для обслуживаемых систем. Стандартными сервисами маршрутизаторов являются, например, определение топологии (topology mapping) и управление трафиком (traffic engineering).

Таблица маршрутизации, иногда называемая базой данных маршрутизации – это набор маршрутов, используемых маршрутизатором в данный момент времени. Крупные сети не могут обойтись без периодического обмена сообщениями для описания сети, однако большинство из них избыточны.



По этой причине сложные сети испытывают проблемы при выходе линий связи из строя из-за того, что несуществующие маршруты могут оставаться в таблице маршрутизации в течение длительного периода времени.

## 1.7 Структура и оценка объемов трафика различных приложений

Услуги мультисервисной сети существенно отличаются друг от друга своими требованиями к составу и объему сетевых ресурсов, в первую очередь – к ширине полосы пропускания звена сети. Наиболее ресурсоемким в отношении ширины полосы пропускания является предоставление услуг, связанных с передачей видеопотоков, например телевидение и видео по запросу. Уже сегодня среднему клиенту из жилого сектора понадобятся услуги указанные в таблице 1.1.

Т а б л и ц а 1.1 – Предоставление современных услуг пользователю

Услуги	Скорость передачи, Мбит/с
HDTV на плазменную панель в гостиную(MPEG-4 HD)	7-10
SDTV на кухню	1,7-4
Линия VoIP	До 0,1
Терминал видеотелефонной связи	До 0,5
Высокоскоростной Интернет	1-4
P2P на скачивание музыкального файла	До 5
Итого	15-25

На основании вышеописанного видно, что различные приложения требуют от сети соответствующего обслуживания. В свою очередь сеть может представить сервисные модели качества обслуживания (QoS).

Набор предоставляемых услуг, особенно сервисов реального времени, предъявляет жесткие требования к транспортной подсистеме. Это необходимо учитывать при разработке архитектуры перспективной сети. Для примера отметим, что видеотрафик характеризуется битовым потоком с относительно постоянной скоростью, при этом большинство абонентов услуги "видео по запросу" пользуются ею примерно в одно и то же время – вечером, что является причиной неравномерной нагрузки на сеть. Принципиальным в данном случае являются различия в требованиях, предъявляемых к необходимой полосе пропускания услуг "видео по запросу" и вещания. "Видео по запросу" предполагает передачу в режиме Unicast (индивидуальная рассылка), а IP-вещание реализуется в режиме Multicast (групповая рассылка). В таблице 1.2 представлена оценка объемов трафика различных приложений (конкретные основные показатели нагрузок на сеть в зависимости от

предоставляемого сервиса). В этой таблице N – объем абонентской базы оператора, цифры приведенные в таблице получены на основе анализа опыта телекоммуникационных операторов (статистика), материалов маркетинговых исследований с учетом прогноза [21].

Т а б л и ц а 1.2 – Оценка объемов трафика различных приложений

Услуги	Полоса пропускания на 1го аб., Мбит/с	Макс.кол-во абонентов, пользующихся услугой	Доля аб., пользующ. услугой одноврем.	Итоговая полоса пропускания для услуги, Мбит/с
Доступ в Интернет	0,256	$N \times 80\% = 0,8N$	20%	$0,256 \times 0,8N \times 0,20 = 0,041N$
IPTV ТВ-вещ. Видео по запросу	4(MPEG-2) 2(MPEG-4) 19(HDTV)	Количество каналов=100 $N \times 5\% = 0,05N$	100%  10%	$MPEG - 2 = 4 \cdot 100 \cdot 1 = 400$ $MPEG - 4 = 2 \cdot 100 \cdot 1 = 200$ $19 \cdot 0,05N \cdot 0,1 = 0,095N$
Голос Аудиотел Видеотел	0,084(G.711) 0,55(H.264)	$N \times 50\% = 0,5N$ $N \times 2\% = 0,02N$	15% 15%	$0,084 \cdot 0,5N \cdot 0,15 = 0,0063N$ $0,55 \cdot 0,02N \cdot 0,15 = 0,0017N$
Др.усл. L2VPN L3VPN E1	2 2 2	$N \times 1\% = 0,01N$ $N \times 1\% = 0,01N$ $N \times 1\% = 0,01N$	80% 80% 80%	$2 \cdot 0,01N \cdot 0,8 = 0,016N$ $2 \cdot 0,01N \cdot 0,8 = 0,016N$ $2 \cdot 0,01N \cdot 0,8 = 0,016N$
Доступ к ЛВС FTP, Gaming	2	$N \times 20\% = 0,2N$	20%	$2 \cdot 0,2N \cdot 0,20 = 0,08N$
Итого (минимальная полоса, которую занимает абонентский трафик в магистральном кольце сети передачи данных)				$0,272N + 400(MPEG - 2)$ $0,272N + 200(MPEG - 4)$

Рассмотрим каждый сервис подробнее:

- потоковое видео. Обеспечивает пользователям просмотр каналов эфирного и спутникового телевидения, упакованных в IP-поток. С целью оптимизации использования доступной пропускной способности вещание должно производиться в режиме Multicast. В зависимости от выбранной системы кодирования и шифрования необходимо наличие пропускной способности на канал в соответствии с приведенной таблицей. Телевизионный трафик не предъявляет жестких требований к задержкам в транспортной сети, максимальный джиттер пакетов может составлять 50 мс.;

- видео по запросу. С точки зрения транспортной подсистемы запрос и получение услуг "видео по запросу" представляет собой асимметричное

взаимодействие, при котором по прямому каналу в Unicast-режиме передаются цифровые видеопотоки и интерфейс пользователя, а в обратном канале - запросы на получение информации. Требования к обратному каналу незначительные: максимально необходимая скорость не превышает 33,6 кбит/с. Скорость в прямом канале, указанная в таблице, представляет собой среднее значение полосы, занимаемой сигналом ТВ высокой четкости, поскольку в большинстве случаев сервис "видео по запросу" будет реализовываться в формате HDTV;

- доступ к ресурсам Интернета. Эта служба не предполагает каких-либо специальных требований к параметрам транспортной сети. Поскольку настройка политики качества обслуживания рассматривает Интернет-трафик как низкоприоритетный, он не становится "конкурентом" для приложений реального времени. В том случае, если клиентам должен предоставляться Интернет-доступ с гарантированной скоростью, необходимо выполнение процедур traffic-shaping на маршрутизаторе, что значительно усложняет задачи эксплуатации сети. Поэтому оптимальной представляется модель с максимально возможной скоростью доступа и расширением доступной полосы пропускания по мере необходимости. При этом доступная полоса пропускания равномерно распределяется между активными клиентами. Данная схема позволит максимально удовлетворить ожидания клиента, увеличить потребление трафика и прибыль от предоставления услуги;

- сервис аудио/видеотелефонной связи. В рамках службы IP-телефонии возможно как предоставление стандартного телефонного сервиса, так и его расширение - за счет использования видеотелефонов различного типа (в том числе программных). Во втором случае системы фактически являются аналогами систем видео-конференц-связи и могут обслуживаться теми же управляющими комплексами, что и службы IP-телефонии. Для обеспечения нормального функционирования данных приложений необходимо создание симметричного канала с показателями пропускной способности (аудиотелефонная связь 83,44-91,56 кбит/с (G.711, Ethernet) и видеотелефонная связь 549,4 кбит/с (H.264, Ethernet). Для достижения требуемого качества сервиса со стороны транспортной сети необходима поддержка механизмов QoS, обеспечение минимальной задержки прохождения голосового трафика от границы до границы сети (не более 60 мс), джиттер не более 20 мс.;

- к прочим услугам отнесем использование ресурсов транспортной сети в виде аренды определенной полосы пропускания (цифрового потока) или реализации корпоративной сети: L2, L3 VPN.

Одной из основных задач при построении сети IPTV является создание единой мультисервисной сети, нейтральной к типу проходящего трафика (голос, видео, данные), но обеспечивающей необходимый уровень обслуживания каждому из приложений в соответствии с заданными параметрами. На основе оценки объемов абонентского трафика различных приложений можно определить минимальную необходимую общую

пропускную способность кольца сети передачи данных (СПД) в зависимости от количества абонентов/жилищ (рисунок 1.7).

Учитывая повсеместное распространение IP как основного формата представления информации на уровне сети, под передачей трафика в мультисервисной сети следует понимать передачу именно IP-трафика.

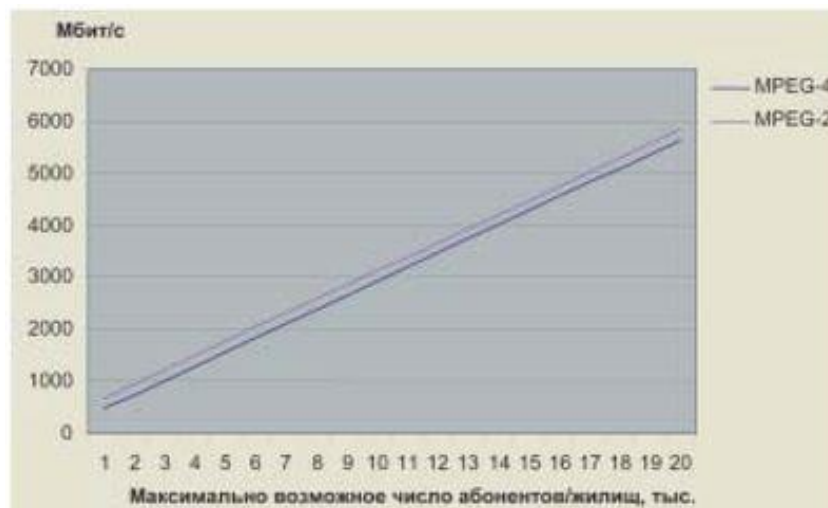


Рисунок 1.7 – Оценка минимальной необходимой общей пропускной способности кольца СПД в зависимости от количества абонентов

Технически IP-технологии достигли такого развития, что необходимость использования специальных дорогих решений для передачи видео по широкополосным сетям практически отпадает. С экономической точки зрения технология IP позволяет создавать интеллектуальные масштабируемые сети, обеспечивающие защиту как ранее сделанных инвестиций (благодаря использованию уже имеющейся оптоволоконной инфраструктуры), так и новых вложений (ввиду универсальности оборудования IP).

По указанным причинам протокол сетевого уровня IP принимается как базовый для реализации сквозного транспорта пакетов во всей сети.

На канальном уровне 100-мегабитный Ethernet доминирует в качестве стандарта для пользовательского доступа, а на магистральных каналах наблюдается рост использования 1- и 10-гигабитных скоростей. Доминирование технологии Ethernet обусловлено главным образом ее простотой и низкой стоимостью. В рассматриваемой сети технологии канального уровня Ethernet на базе различных сред передачи и скоростей применяются как на узлах сети, так и в сегментах пользовательского доступа.

При выборе телекоммуникационной технологии, реализуемой в магистральном компоненте сети, основное внимание необходимо уделять возможности динамического распределения ресурсов каналов связи, механизмам обеспечения качества обслуживания и диапазону поддерживаемых скоростей передачи.

## 1.8 Качество обслуживания мультисервисной сети

До конца 1980-х годов Internet пребывала в таком состоянии, что характеризовалось низким объемом трафика и малым числом используемых сетевых приложений. Поддержкой байта тип обслуживания ToS (Type of Service) можно было пренебречь, что и осуществлялось практически во всех реализациях протокола IP. IP-приложения не производили установку значения байта тип обслуживания ToS, а маршрутизаторы игнорировали его при принятии решения о продвижении IP-пакета.

Важность внедрения механизма QoS (Quality of Service) в масштабах Internet возросла благодаря увеличению популярности Сети и приобретению ею коммерческих черт. Функционирование Internet базируется на сквозном режиме обслуживания пакетов данных без ориентации на установку соединения, который подразумевает негарантированную доставку информации с использованием для этого двух протоколов – протокола управления передачей TCP (Transmission Control Protocol) и протокола Internet IP (Internet Protocol), известную как стек TCP/IP. Несмотря на то, что отсутствие ориентации на установку соединения делает Internet более гибкой и устойчивой к сбоям, динамика передаваемых потоков данных делает ее склонной к перегрузкам, которые чаще всего возникают в местах стыка двух сетей со значительно различающимися пропускными способностями.

Следовательно, сети с коммутацией пакетов на основе протокола IP не обеспечивают гарантированной пропускной способности, поскольку не гарантируют доставку.

Для приложений, где не важен порядок и интервал прихода пакетов, время задержек между отдельными пакетами не имеет решающего значения. Например, для IP-телефония важен порядок прихода пакетов и важна динамика передачи сигнала, которая обеспечивается современными методами кодирования и передачи информации. Транспортные протоколы стека TCP/IP, функционирующие поверх протокола IP, не обеспечивают высокого качества обслуживания трафика, чувствительного к задержкам. Протокол TCP, хоть и гарантирует достоверную доставку информации, но переносит ее с непредсказуемыми задержками. Протокол UDP, который, как правило, используется для переноса информации в реальном времени, обеспечивает меньшее, по сравнению с протоколом TCP, время задержки, но, как и протокол IP, не содержит никаких механизмов обеспечения качества обслуживания [22].

Качество обслуживания в основном используется для определения набора измеряемых параметров сервиса. В IP-сети QoS может представляться, например, производительностью передачи IP-пакетов через одну или большее число сетей.

Кроме задач по увеличению производительности и надежности сетей, поставщики сетевых сервисов стремятся к предоставлению пользователю

«сквозного» (end-to-end), гарантируемого качества сервиса для передачи различных типов данных, включая видео, мультимедиа и голос.

Необходимое обслуживание описывается многими параметрами, характеризующие качество обслуживания [23]:

- готовность предоставляемого сервиса (service availability) – определяет надежность соединений пользователей с сервис-провайдером;

- задержка (delay) – характеризует интервал между приемом и передачей пакетов;

- вариация, или флуктуация, задержки (jitter) – параметр, описывающий возможные отклонения от времени задержки при передаче пакетов;

- производительность, или пропускная способность (throughput – скорость передачи пакетов в сети; выделяют среднюю (average rate) и пиковую (peak rate) скорости;

- полоса пропускания (bandwidth) – описывает номинальную пропускную способность среды передачи информации, определяет ширину канала, измеряется в бит/с, кбит/с, Мбит/с;

- скорость потери пакетов (packet loss rate) – максимальная скорость, на которой пакеты могут быть отвергнуты во время передачи по сети; потеря пакетов обычно происходит вследствие перегрузок сети (congestion).

Современный период соответствует все возрастающее увеличение спроса на инфокоммуникационные услуги. Все большему числу пользователей наряду с традиционными услугами связи требуются услуги передачи данных и доступа в Интернет. Растет спрос на услуги IP-телефонии. Для удовлетворения этого спроса операторы связи проводят модернизацию существующих и строительство новых сетей, обеспечивая постепенный переход к мультисервисным сетям. Мультисервисная сеть (МС) – это сеть связи, построенная в соответствии с концепцией NGN (Next Generation Network) и обеспечивающая предоставление неограниченного набора услуг.

Мультисервисным сетям присуще использование технологий пакетной передачи информации, преобладающими среди которых являются технологии на основе IP-протоколов. Примером может послужить широкое распространение таких услуг, как IP-телефония, видеоконференц-связь, видео и аудио по требованию (VAoD – Video and Audio on Demand) и т.п.

Следовательно, важной частью будущих мультисервисных сетей должны стать механизмы повышения качества обслуживания сети. Задача заключается в том, чтобы обеспечить на всем протяжении сети, независимо от ее масштабов и используемых протоколов, гарантированную доставку данных в рамках определенных фиксированных параметров передачи. Такими параметрами являются готовность предоставляемого сервиса, задержка, вариация задержки, пропускная способность и скорость потери пакетов (или ячеек).

Как показывает текущее состояние сети Internet, обработка всего трафика на равных правах может привести к серьезным проблемам, особенно при ограниченной пропускной способности. Так, пересылка важнейших данных может быть временно заблокирована передачей большого файла. В этой связи,

при создании сети с комбинированными функциями нужно гарантировать необходимый уровень сервиса для каждого приложения. В противном случае пользователи будут вынуждены отказаться от мультисервисной сети.

Функции сети могут изменяться, появляться новые. Меняются и приложения, ориентированные на работу в сети, с собой они приносят новые требования к сети. Пользовательские рабочие станции сейчас предоставляют услуги по обработке сообщений, видеoinформации, телефонии и т.д.

Поэтому возникла необходимость гарантировать время реакции, пропускную способность сети и другие параметры сети.

Полоса пропускания. Термин полоса пропускания (bandwidth) используется для описания номинальной пропускной способности среды передачи информации, протокола или соединения. Этот термин достаточно эффективно определяет «ширину канала», требующуюся приложению для взаимодействия по сети.

Как правило, каждое соединение, нуждающееся в гарантированном качестве обслуживания, требует от сети резервирования минимальной полосы пропускания.

К примеру, приложения, ориентированные на передачу оцифрованной речи, создают поток информации интенсивностью 64 кбит/с. Эффективное использование таких приложений становится практически невозможным вследствие снижения полосы пропускания ниже 64 кбит/с на каком-либо из участков соединения.

Задержка и дрожание при передаче пакетов. Задержка при передаче пакета (packet delay), или латентность (latency), на каждом переходе состоит из задержки сериализации, задержки распространения и задержки коммутации. Классификация типов задержки:

- задержка сериализации (serialization delay). Время, которое требуется устройству на передачу пакета при заданной ширине полосы пропускания. Задержка сериализации зависит как от ширины полосы пропускания канала передачи информации, так и от размера передаваемого пакета. Например, передача пакета размером 64 байт при заданной полосе пропускания 3 Мбит/с занимает всего лишь 171 нс. Задержка сериализации очень сильно зависит от полосы пропускания: передача того же самого пакета размером 64 байт при заданной полосе пропускания 19.2 кбит/с занимает уже 26 мс. Довольно часто задержку сериализации называют еще задержкой передачи (transmission delay);

- задержка распространения (propagation delay). Время, которое требуется переданному биту информации для достижения принимающего устройства на другом конце канала. Эта величина существенна, так как в наилучшем случае скорость передачи информации соизмерима со скоростью света. Задержка распространения зависит от расстояния и используемой среды передачи информации, а не от полосы пропускания. Для линий связи глобальных сетей задержка распространения измеряется в миллисекундах;

- задержка коммутации (switching delay). Время, которое требуется устройству, получившему пакет, для начала его передачи следующему устройству. Как правило, это значение меньше 10 нс.

Обычно каждый из пакетов, принадлежащий одному и тому же потоку трафика, передается с различным значением задержки. Задержка при передаче пакетов меняется в зависимости от состояния промежуточных сетей.

В том случае, если сеть не испытывает перегрузки, пакеты не ставятся в очередь в маршрутизаторах, а общее время задержки при передаче пакета состоит из суммы задержки сериализации и задержки распространения на каждом промежуточном переходе. В этом случае можно говорить о минимально возможной задержке при передаче пакетов через заданную сеть. Следует отметить, что задержка сериализации становится незначительной по сравнению с задержкой распространения при передаче пакета по каналу с большой пропускной способностью.

Если же сеть перегружена, задержки при организации очередей в маршрутизаторах начинают влиять на общую задержку при передаче пакетов и приводят к возникновению разницы в задержке при передаче различных пакетов одного и того же потока. Колебание задержки при передаче пакетов получило название дрожания при передаче пакетов.

Дрожание пакетов имеет большую важность, поскольку именно оно определяет максимальную задержку при приеме пакетов в конечном пункте назначения. Принимающая сторона, в зависимости от типа используемого приложения, может попытаться компенсировать дрожание пакетов за счет организации приемного буфера для хранения принятых пакетов на время, меньшее или равное верхней границе дрожания.

К этой категории относятся приложения, ориентированные на передачу/прием непрерывных потоков данных, например Internet-телефония или приложения, обеспечивающие проведение видеоконференций.

Потеря пакетов. Уровень потери пакетов определяет количество пакетов, отбрасываемых сетью во время передачи. Основными причинами потери пакетов являются перегрузка сети и повреждение пакетов во время передачи по линии связи. Чаще всего отбрасывание пакетов происходит в местах перегрузки, где число поступающих пакетов намного превышает верхнюю границу размера выходной очереди. Кроме того, отбрасывание пакетов может быть вызвано недостаточным размером входного буфера.

Уровень потери пакетов выражается как доля отброшенных пакетов за определенный интервал времени. Некоторые приложения не способны нормально функционировать или же функционируют неэффективно в случае потери пакетов. Эти приложения требуют от сети гарантии надежной доставки всех пакетов. Хорошо спроектированные сети характеризуются очень низким значением потери пакетов. Потеря пакетов также несвойственна приложениям, для которых были заранее зарезервированы требуемые этими приложениями ресурсы. Что касается волоконно-оптических линий связи со значением частоты появления ошибочных битов (Bit Error Rate – BER)  $10E^{-9}$ , то здесь



потеря пакетов возможна только в случае их отбрасывания в местах перегрузки сети. Отбрасывание пакетов, является неизбежным явлением при негарантированной доставке трафика, хотя и в этом случае он обуславливается крайней необходимостью.

## 1.9 Сервисные модели QoS

Сервисные модели QoS:

- Best Effort Service – негарантированная доставка. Абсолютное отсутствие механизмов QoS. Используются все доступные ресурсы сети без какого-либо выделения отдельных классов трафика и регулирования. Считается, что лучшим механизмом обеспечения QoS является увеличение пропускной способности, однако некоторые виды трафика (например, голосовой) очень чувствительны к задержкам пакетов и вариации скорости их прохождения. Модель Best Effort Service даже при наличии больших резервов допускает возникновение перегрузок в случае резких всплесков трафика [24];

- Integrated Service (IntServ) – модель интегрированного обслуживания обеспечивает сквозное (End-to-End) качество обслуживания, гарантируя необходимую пропускную способность. Может обеспечить сквозное (End-to-End) качество обслуживания, гарантируя необходимую пропускную способность. IntServ использует для своих целей протокол сигнализации RSVP, который обеспечивает выполнение требований ко всем промежуточным узлам. Позволяет приложениям выражать сквозные требования к ресурсам и содержит механизмы обеспечения данных требований. IntServ можно кратко охарактеризовать как резервирование ресурсов (Resource reservation). При этом маршрутизаторы должны хранить информацию о потоках и анализировать каждый пакет, определить принадлежит ли он к конкретным потоком, с тем чтобы направить пакет в соответствии с критериями потока;

- Differentiated Service – модель дифференцированного обслуживания обеспечивает QoS на основе распределения ресурсов в ядре сети и определенных классификаторов и ограничений на границе сети, комбинируемых с целью предоставления требуемых услуг. В этой модели вводится разделение трафика по классам, для каждого из которых определяется свой уровень QoS. DiffServ состоит из управления формированием трафика (классификация пакетов, маркировка, управление интенсивностью) и управления политикой (распределение ресурсов, политика отбрасывания пакетов). DiffServ является наиболее подходящим примером «умного» управления приоритетом трафика.

Приложения, требующие QoS:

- потоковые мультимедиа-приложения требуют гарантированную пропускную способность канала;

- VoIP и видеоконференция требуют небольших значений джиттера и задержки;

- ряд приложений, например, удалённая хирургия, требуют гарантированного уровня надёжности.

Базовые функции QoS заключаются в обеспечении необходимых параметров сервиса и определяются по отношению к трафику как:

- классификация;
- разметка;
- управление перегрузками;
- предотвращение перегрузок;
- регулирование.

Функционально классификация и разметка (Classification and Marking) чаще всего обеспечиваются на входных портах оборудования, а управление и предотвращение перегрузок – на выходных. Классификация пакетов представляет собой механизм соотнесения пакета к определенному классу трафика.

Также важной задачей при обработке пакетов является маркировка пакетов (Packet Marking) – назначение соответствующего приоритета.

Классификация и разметка на третьем уровне – маршрутизирующее оборудование оперирует IP пакетами, в которых под цели маркировки предусмотрено соответствующее поле в заголовке – IP Type of Service (ToS) размером один байт. ToS может быть заполнен классификатором IP Precedence или DSCP в зависимости от задачи. IP precedence (IPP) имеет размерность 3 бита (принимает значения 0-7). DSCP относится к модели DiffServ и состоит из 6 бит (значения 0-63).

Кроме цифровой формы, значения DSCP могут быть выражены с использованием специальных ключевых слов:

- доставка по возможности BE (Best Effort);
- гарантированная доставка AF (Assured Forwarding);
- срочная доставка EF (Expedited Forwarding).

Промаркировать IP пакеты значением QoS можно разными способами: PBR, CAR, BGP.

Управление перегрузками. Перегрузки (congestions) возникает в случае переполнения выходных буферов передающего трафик оборудования. Основными механизмами возникновения перегрузок является агрегация трафика (когда скорость входящего трафика превышает скорость исходящего) и несогласованность скоростей на интерфейсах.

Управление пропускной способностью в случае перегрузок осуществляется с помощью механизма очередей. Пакеты помещаются в очереди, которые упорядоченно обрабатываются по определенному алгоритму. Фактически, управление перегрузками – это определение порядка, в котором пакеты выходят из интерфейса (очередей) на основе приоритетов. Если перегрузок нет – очереди не работают.

Маршрутизаторы обеспечивают поддержку очередей программно, что позволяет более гибкое конфигурирование механизмов обработки. При этом маркировка и классификация пакетов выполняется на входе, распределение по очередям и их обработку (Scheduling) по определенным алгоритмам, как показано на рисунке 1.8.

Приоритезация очереди требуется в основном только в узких, загруженных местах, когда пропускной способности канала не хватает для передачи всех поступающих пакетов и нужно каким-то образом дифференцировать их обработку. Кроме того, приоритезация необходима и в случае предотвращения влияния всплесков сетевой активности на чувствительный к задержкам трафик.

Классификация методов обработки очередей [25]:

- очередь с последовательным прохождением пакетов, работающая по принципу FIFO (First In First Out) «первый пришел – первый ушел». Здесь нет никакой приоритезации. Включается по умолчанию на интерфейсах со скоростью больше 2 Мбит/с;

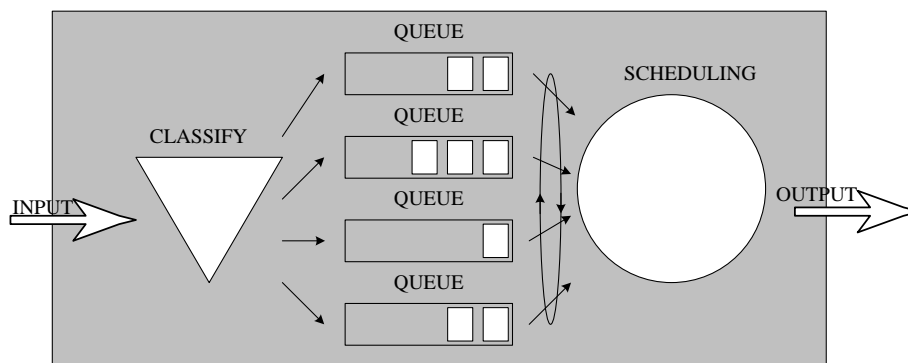


Рисунок 1.8 – Обработка пакетов

- очереди приоритетов PQ (Priority Queuing), которая обеспечивает безусловный приоритет одних пакетов над другими. Всего 4 очереди: high, medium, normal и low. Обработка ведется последовательно (от high до low), начинается с высокоприоритетной очереди и до ее полной очистки не переходит к менее приоритетным очередям. При этом возможна монополизация канала высокоприоритетными очередями. Трафик, приоритет которого не указан, попадет в очередь по умолчанию (default);

- взвешенные справедливые очереди WFQ (Weighted Fair Queuing), которая автоматически разбивает трафик на потоки (flows). По умолчанию их число равно 256, но может быть изменено. Если потоков больше, чем очередей, то в одну очередь помещается несколько потоков. Принадлежность пакета к потоку (классификация) определяется на основе TOS, протокола, IP адреса источника, IP адреса назначения, порта источника и порта назначения. Каждый поток использует отдельную очередь. Обработчик WFQ (scheduler) обеспечивает равномерное деление полосы между существующими

потоками. Доступная полоса делится на число потоков и каждый получает равную часть. Каждый поток получает свой вес (weight), с некоторым коэффициентом обратно пропорциональный IP приоритету (TOS). Вес потока также учитывается обработчиком. WFQ автоматически справедливо распределяет доступную пропускную способность, дополнительно учитывая TOS. Потоки с одинаковыми IP приоритетами TOS получают равные доли полосы пропускания; потоки с большим IP приоритетом – большую долю полосы. В случае перегрузок ненагруженные высокоприоритетные потоки функционируют без изменений, а низкоприоритетные высоконагруженные – ограничиваются. Вместе с WFQ работает RSVP. По умолчанию WFQ включается на низкоскоростных интерфейсах;

- обслуживания очередей на основе классов CBWFQ (Class Based Weighted Fair Queuing). Весь трафик разбивается на 64 класса на основании следующих параметров: входной интерфейс, доступный лист (access list), протокол, значение DSCP, метка MPLS QoS. Общая пропускная способность выходного интерфейса распределяется по классам. Выделяемую каждому классу полосу пропускания можно определять как в абсолютное значение (bandwidth в kbit/s) или в процентах (bandwidth percent) относительно установленного значения на интерфейсе. Пакеты, не попадающие в сконфигурированные классы, попадают в класс по умолчанию, который можно дополнительно настроить и который получает оставшуюся свободной полосу пропускания канала. При переполнении очереди любого класса пакеты данного класса игнорируются. Алгоритм отклонения пакетов внутри каждого класса можно выбирать: включенное по умолчанию обычное отбрасывание (tail-drop, параметр queue-limit) или WRED (параметр random-detect). CBWFQ поддерживает взаимодействие с RSVP;

- очередность с низкой задержкой LLQ (Low Latency Queuing). LLQ можно рассматривать как механизм CBWFQ с приоритетной очередью PQ (LLQ = PQ + CBWFQ). PQ в LLQ позволяет обеспечить обслуживание чувствительного к задержке трафика. LLQ рекомендуется в случае наличия голосового (VoIP) трафика. Кроме того, он хорошо работает с видеоконференциями.

Предотвращение перегрузок (Congestion avoidance):

- RED (Random Early Detection) используется в скоростных сетях для предупреждения перегрузок. Затрагивает только TCP. Путем отбрасывания случайным образом пакетов из наиболее мощных потоков вынуждает посылающую сторону уменьшить скорость передачи (используя соответствующие свойства TCP протокола – окно перегрузки. Доля отбрасываемых пакетов регулируется при конфигурации;

- ECN (Explicit Congestion Notification) использует ту же логику, что и RED, но не отбрасывает пакеты, а уведомляет о необходимости ограничения, маркируя их (устанавливает в IP заголовке ECN биты).

Регулирование интенсивности:

- ограничитель (Policer);

- формирователь (шейпер, Shaper).

Ограничитель соответственно ограничивает поток трафика до нужной величины методом простого отбрасывания пакетов, поступающих с выходящей за рамки скоростью. Может работать как на входящем, так и на выходящем интерфейсах. То есть это ограничитель интенсивности методом отбрасывания при превышении заданной скорости. На рисунке 1.9 показан механизм ограничения трафика.

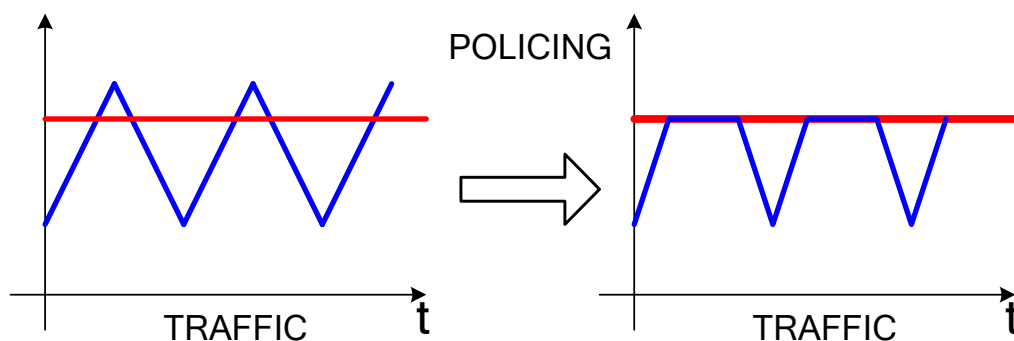


Рисунок 1.9 – Механизм ограничения

Управление интенсивностью осуществляется ограничением трафика до скорости контракта. Следует отметить, что ограничение трафика может помочь и в случае предотвращения DOS атак. применяется как на входных, так и на выходных портах. Чаще всего на входных, так как в этом случае отбрасываемые пакеты не доходят до процесса маршрутизации и таким образом экономятся ресурсы. Формирователь обычно задерживает исходящий трафик, используя буфер или механизм очередей, формируя поток с нужными параметрами. Выполняет функции сглаживания.

Применяется для ограничения пропускной способности на выходе из интерфейса. Охарактеризовывается как ограничитель-выравниватель интенсивности методом задержки (буферизации пакетов) и дальнейшей пересылки с согласованной интенсивностью при превышении заданной скорости. Декларируется, что шейпинг более дружелюбен к TCP, чем полисинг.

Применяется всегда на выходном интерфейсе в случаях:

- если где-то далее в сети применяется полисинг, который, как известно, приводит к отбрасыванию пакетов. Лучше заранее на подходах «мягко» ограничить трафик перед полисингом;
- если где-то далее в сети возможно переполнение входных очередей, а QoS там не настроен или невозможен;
- ограничение скорости доступа до контрактных значений.

На рисунке 1.10 показан формирователь.

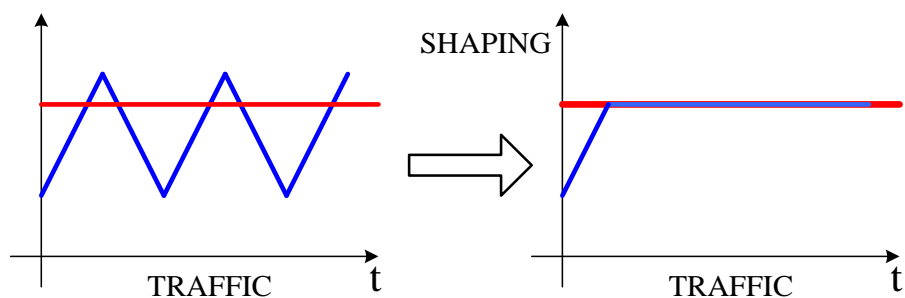


Рисунок 1.10 – Формирователь трафика

Вследствие буферизации пакетов и образования очередей пакетов в сетевых устройствах сетей с коммутацией пакетов возникают следующие проблемы: потеря пакетов и неопределенность величины задержки пакетов.

Для оценки качества обслуживания используются следующие характеристики: задержка пакетов, изменение величины задержки пакетов (вариации задержки) и потеря пакетов (используют не надежную IP-сеть).

### 1.10 Имитационное моделирование на GPSS

Джеффи Гордон в 1961 г разработал язык моделирования GPSS (General Purpose Simulating System – моделирующая система общего назначения). Пакет GPSS предназначен для ИМ дискретных систем и входит в число наиболее распространенных и используемых на практике средств автоматизации имитационного моделирования. Одна из последних версий пакета GPSS для персональных компьютеров, работающих по управлением ОС Windows, называется GPSS World.

Пакет GPSS реализует собственный язык ИМ, в основу которого положен транзактный способ организации квазипараллелизма и способ изменения модельного времени «шагом до следующего события».

Это блочно-ориентированная концепция, разработанная с ориентацией на описание СМО. Имитационная модель в GPSS представляет собой последовательность текстовых строк, каждая из которых определяет правила создания, перемещения, задержки и удаления транзактов.

### 1.11 Цель исследования и постановка основных задач

В соответствии с вышеизложенным, целью диссертационной работы является анализ приложения реального времени, выявления его особенностей, анализ моделей качества обслуживания опорной IP сетью,

анализ классификации поступающего трафика на маршрутизатор, исследование измеренного реального сетевого трафика на фрактальную размерность, исследование влияния самоподобности поступающего трафика на маршрутизатор с разработкой имитационных моделей в оболочке GPSS World при поступлении простейшего и самоподобного трафиков данных на маршрутизатор.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- измерить реальный трафик данных;
- осуществить исследование измеренного сетевого трафика реального времени, выявить наличие свойств самоподобия;
- разработать имитационные модели для сравнительного анализа среднего времени ожидания в очереди от загрузки простейшего и самоподобного потоков;
- разработать имитационные модели при приоритетной очередности для простейшего и самоподобного потоков.

### **1.12 Выводы по первой главе**

Выводами по первой главе являются:

- мультисервисная сеть имеет опорную сеть с пакетной коммутацией;
- сетевые устройства разработаны в соответствии с классической теории телетрафика;
- наблюдается рост числа приложений, пропускаемых пакетной сетью;
- свойства современного мультисервисного трафика имеют пачечную природу.

## 2 Самоподобный трафик

### 2.1 Основные понятия теории фракталов

С развитием высокоскоростных сетей связи, все большее влияние на качество обслуживания оказывает так называемое свойство самоподобия потоков. С практической точки зрения это можно объяснить высокой изменчивостью интенсивности трафика и, как следствие, высокой пачечностью поступления пакетов в узел сети при высокой скорости передачи данных, что приводит, из-за ограниченности буфера, к потерям пакетов.

Продолжительное время считалось, что трафик локальной сети описывается классическим Пуассоновским распределением. Телефонные сети изначально строились по принципу коммутации каналов, а в основе компьютерных сетей, как правило, лежит принцип коммутации пакетов, но методики расчетов остались практически теми же. Пакеты при высокой скорости их движения по сети поступают на узел не по отдельности, а целой пачкой. Трафик в таких сетях имеет пульсации, что повышает вероятность перегрузок в узлах сети, которые ведут к переполнению буферов и вызывают потери и/или задержки [26].

Пульсации приводят к перепадам скорости информационных потоков, при которых отношение максимального значения к минимальной скорости составляет десятки раз. При этом оказалось, что в мультисервисных сетях число событий на заданном временном интервале зависит от прежних, весьма отдаленных событий. Это означает, что при больших масштабах мультисервисной сети трафик обладает свойством самоподобия, т.е. выглядит качественно одинаково при любых достаточно больших масштабах временной оси.

Термин "фрактал" происходит от латинского слова fractus (сломанный, разбитый), от которого происходят и термины fraction, fractional - дробь, дробный. С математической точки зрения фрактал - это множество с дробной размерностью. Фрактал по первому определению Мандельброта - это множество, хаусдорфова размерность которого превосходит его топологическую размерность. По второму определению фрактал это геометрическая структура, части фрагменты которой в какой-то мере подобны самой структуре. Можно также сказать, что математическое понятие фрактала выделяет объекты, обладающие структурами различных масштабов, как больших, так и малых, и, таким образом, отражает иерархический принцип организации материи в природе. В основе этого понятия содержится одна важная идеализация действительности: фрактальные объекты самоподобны, то есть их вид не претерпевает существенных изменений при разглядывании их в микроскоп с любым увеличением. При этом линия имеет одно измерение, поверхность двумерна, а пространственная фигура трехмерна. Фрактал же - это



не линия и не поверхность, а что-то среднее. Размерность объекта (показатель степени) показывает, по какому закону растет его внутренняя область. Аналогичным образом с ростом размеров возрастает "объем" фрактала, но его размерность - величина не целая, а дробная. Поэтому граница фрактальной фигуры не линия: при большом увеличении становится видно, что она размыта и вся состоит из спиралей и завитков, повторяющих в малом масштабе саму фигуру. Такая геометрическая регулярность называется масштабной инвариантностью или масштабным самоподобием, скейлингом (scaling). Она-то и определяет дробную размерность фрактальных фигур. Более того, можно сказать, что фракталы - геометрические образы хаоса, а фрактальная геометрия - геометрия хаоса, беспорядка. Ключевыми понятиями теории фракталов являются дробная размерность и масштабное самоподобие.

В условиях самоподобного трафика, методы расчета компьютерной сети (пропускной способности каналов, емкости буферов и пр.) основанные на марковских моделях и формулах Эрланга, которые с успехом используются при проектировании телефонных сетей, дают неоправданно оптимистические решения и приводят к недооценке нагрузки [27, 28].

С этого времени возрос интерес к проявлению фрактальных свойств процессов в телекоммуникациях. За рубежом данному направлению посвящено большое количество исследований, которое демонстрирует, что трафик для большинства видов сервисов является самоподобным. Проблеме исследования различных типов сетевого трафика на самоподобие посвящено много работ. В этих работах доказывают то, что сетевой трафик является самоподобным (self-similar) или фрактальным (fractal) по своей природе, то есть в нем присутствуют так называемые вспышки или пачки (burst) данных, наблюдаемые в различных временных интервалах (от миллисекунд до минут или даже часов) и корреляция между пакетами. Установлено, что трафик данных высокоскоростных сетей обладает самоподобными или фрактальными свойствами. Поэтому рассчитывать сети с пакетной коммутацией методами, основанными на марковских моделях и формулах Эрланга, которые используются при проектировании телефонных сетей, нерационально, поскольку это приводит к недооценке нагрузки.

## **2.2 Самоподобие в системах массового обслуживания**

Самоподобный трафик имеет особую структуру, сохраняющуюся при многократном масштабировании, т.е. в реализации присутствует некоторое количество выбросов при относительно небольшом среднем уровне трафика. Это явление ухудшает характеристики при прохождении самоподобного трафика через узлы сети. Самоподобные модели могут проявлять свойство долговременной зависимости, что означает проявление зависимости между событиями через достаточно большие промежутки времени. Неформально

самоподобный процесс определяется как случайный процесс, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабирования. В отличие от пуассоновских процессов самоподобные характеризуются наличием последствия: вероятность поступления следующего (очередного) события зависит не только от времени, но и от предыдущих событий (предыстории). Это означает, что число текущих событий может зависеть от числа предыдущих событий в отдаленные промежутки времени.

Существуют потоки, в которых вероятность появления следующего события зависит от наступления событий в предыдущих интервалах времени. Типичным примером таких потоков являются потоки с ограниченным последствием. Для них задается конечный набор функций распределения для соседних интервалов  $\tau_k$  между поступлением  $k$  событий. Однако такие модели учитывают лишь средние значения характеристик или их доверительные границы. Такие модели используются обычно для вычисления предварительных грубых оценок необходимой пропускной способности сети. Такие же модели целесообразно использовать и в тех случаях, когда точные и надежные значения исходных значений параметров трафика недоступны по каким-то причинам.

Однако усложнение в последнее время природы абонентского трафика приводит к тому, что не учет случайных флуктуаций может приводить к перебоям в обслуживании даже для больших узлов, поэтому рассматриваются различные математические модели абонентского трафика, использующие и различные средства его описания. Желание пользователя получать одновременно услуги традиционной телефонии и передачи данных определяют вектор развития сетей связи. Одним из важных статистических свойств нагрузки, создаваемой современными приложениями, является наличие зависимости между отдельными ее частями, которая не исчезает при изменении шкалы времени в сторону укрупнения, как это происходит с традиционными случайными процессами, используемыми для описания нагрузки в теории телетрафика. Так, например, для пуассоновского процесса соответствующая корреляция всегда равна нулю, а для марковского процесса с конечным числом состояний - экспоненциально убывает к нулю. Интеграция в сетях с коммутацией пакетов различного по своей природе трафика, а так же особенности используемых технологий передачи данных для построения сетей связи и повышенная активность пользователей сетей, являются некоторыми из причин проявления самоподобного характера сетевого трафика или, по-другому, его фрактальных свойств. Анализ современных технологий и сетей передачи информации показывает, что необходимо рассматривать вектор абонентской нагрузки, состоящий из нескольких компонент, каждая из которых должна отражать свойства трафика некоторых групп абонентов с одинаковыми интегральными характеристиками. Так как каждая из них описывает трафик принципиально различного происхождения: например одна – голосовой трафик, вторая – трафик данных, третья – видео в режиме

реального времени и т.п., то можно считать эти компоненты статистически независимыми [29].

В связи с этим обслуживаемый трафик  $X$  должен рассматриваться как сумма нескольких компонент:

$$X = \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n (\lambda_i t + \sqrt{a_i \lambda_i} Z_t^{(i)}) = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t + \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \lambda_i} Z_t^{(i)}, \quad (2.1)$$

где  $X_i$  – некоторый стандартный процесс, описывающий  $i$ -ую компоненту трафика, и процессы  $X_i$  статистически независимы;  $Z_t^{(i)}$  – фрактальное броуновское движение со значением параметра Херста  $H_i$ .

Следовательно, поступающий трафик состоит из смеси нескольких процессов с различными значениями параметра Херста и имеет сложную природу и трудно исследовать его свойства. Поэтому наиболее важным является выяснить, насколько существенно зависят его свойства от значений параметра Херста его компонент. С ростом параметра Херста такие статистические свойства процесса как предсказуемость, размах значений и т.п. лишь ухудшаются. Точное определение значения параметра Херста затруднительно в том случае, когда имеется лишь одна компонента. Поэтому определить статистическими средствами все параметры, характеризующие смесь (1.2) является невозможной, особенно если интенсивности отдельных компонент являются относительно малыми. Поскольку основным параметром, характеризующим качество обслуживания сети, является вероятность потери пакетов и важной является задача определения чувствительности этого параметра от значений параметра Херста. Это означает, что при проектировании сетевых устройств необходимо учитывать все компоненты трафика; потому что возможны перегрузки в сети, которые будут возникать существенно чаще, чем расчетное значение, полученное при проектировании и устройства не смогут адекватно отразить реальный поток событий, так как в нем обнаруживается долговременная зависимость (число событий на заданном временном интервале зависит от числа событий, поступивших в отдаленные от него интервалы времени). Способом измерения такой зависимости для случайных процессов является определение функции корреляции.

Самоподобный трафик имеет особую структуру, сохраняющуюся при многократном масштабировании, то есть в реализации присутствует некоторое количество выбросов при относительно небольшом среднем уровне трафика.

Самоподобные процессы можно обнаружить по нескольким равноценным признакам [30]:

- они обладают гиперболически затухающей корреляционной функцией вида  $R(k) \approx k^{(2H-2)}L(t)$  при  $k \rightarrow \infty$ . Следовательно, корреляционная функция является не суммируемой и ряд, образованный последовательными значениями

корреляционной функции, расходится  $\sum_k R(k) = \infty$ . Эта бесконечная сумма является еще одним определением долговременной зависимости (ДВЗ), поэтому все самоподобные процессы являются долговременно зависимыми. Последствия этого существенны, так как кумулятивный эффект в широком диапазоне задержек может значительно отличаться от того, который наблюдается в кратковременной зависимости (КВЗ) процессе (например, пуассоновский). Анализ телетрафика базируется на КВЗ, для которых ДВЗ могут вызвать серьезные последствия. Потому что ДВЗ является причиной длительных пульсаций, которые превышают средний уровень трафика и это может привести переполнению буферов и вызвать потери, задержки; дисперсия выборочного среднего затухает медленнее, чем величина обратная размеру выборки. Если ввести в рассмотрение новую временную последовательность  $\{X_i^{(m)}; i = 1, 2, \dots\}$ , полученную путем усреднения первоначальной последовательности  $\{X_i; i = 1, 2, \dots\}$  по непересекающимся последовательным блокам размера  $m$ , тогда для самоподобных процессов характерно более медленное уменьшение дисперсии по закону  $\sigma^2(X^{(m)}) \propto m^{2H-2}$ , при  $m \rightarrow \infty$ , в то время как для теории телетрафика  $\sigma^2(\{X_i^{(m)}; i = 1, 2, \dots\}) = \sigma^2 m^{-1}$  то есть уменьшается обратно пропорционально объему выборки. Это говорит о том, что статистические характеристики выборки (среднее значение и дисперсия) будут сходиться особенно при  $H$  к 1. Это выражается на всех мерах самоподобных процессов;

- при рассмотрении самоподобного процесса в частотной области, то проявление ДВЗ приводит к степенному характеру спектральной плотности вблизи нуля. А процессы КВЗ характеризуются спектральной плотностью, имеющей положительное и конечное значение при  $w=0$ .

Самоподобные процессы выражены в медленном убывании дисперсии, долговременной зависимости (проявление зависимости между событиями через достаточно большие промежутки времени) и флуктуационном характере спектра мощности таких процессов. Самоподобные процессы в литературе также часто называют автомодельными [12, 32, 33].

Проще всего долговременную зависимость характеризовать одним параметром – показателем Херста  $H$ . Для оценки этого параметра существует множество методов.

Значение  $H=0,5$  показывает отсутствие самоподобности, а большие значения  $H$  (близкие к 1) подтверждают наличие долговременной зависимости.

Среди моделей, предназначенных для имитации фрактального трафика, можно выделить следующие [27]:

- модели на основе «динамического моделирования Маркова». Эти модели представляют собой автоматы с конечным числом состояний, изображаемые диаграммами состояний. Выходом модели является набор вероятностей появления символов;

- нейросетевые модели, которые позволяют решить задачу аппроксимации нескольких переменных по выборке путем погружения временного ряда в многомерное пространство;

- ON/OFF-модели. В этих моделях трафик рассматривается как комбинация источников, которые его генерируют. В так называемые ON-периоды они могут генерировать пакеты информации. После ON-периода следует OFF-период, когда источник не генерирует пакеты. Размер ON- и OFF-периодов является случайной величиной, которая должна иметь конечное математическое ожидание и бесконечную дисперсию;

- мультифрактальные модели воспроизводят трафик, агрегированный от нескольких источников. Мультифрактальность трафика проявляется в изменении статистических свойств реализации трафика при изменении масштаба агрегирования;

- фрактальное броуновское движение. В основе этой модели лежит случайный процесс, начинающийся в начале координат с независимыми бесконечно малыми гауссовскими приращениями. Для генерации фрактального броуновского движения используются алгоритмы случайного перемещения средней точки или алгоритмы последовательного случайного сложения;

- фрактальный гауссовский шум – стохастический процесс с определенными параметрами и автокорреляционной функцией заданного вида. Эта модель имеет дополнительный параметр Херста, который количественно определяет степень фрактального масштабирования.

Результаты реализации перечисленных моделей дают возможность получить достоверное представление о поведении трафика в сети, что необходимо для проектирования и управления телекоммуникационными сетями.

Неформально самоподобный (фрактальный) процесс можно определить как случайный, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабирования. Самоподобный процесс существенно не меняет вида при рассмотрении в различных масштабах по шкале времени. В частности, в отличие от процессов, не обладающих фрактальными свойствами, не происходит его бы строго сглаживания при усреднении по шкале времени – процесс сохраняет склонность к всплескам [33, 34].

Пусть  $\{X_k; k = 0, 1, 2, \dots\}$  – стационарный случайный процесс.

Учитывая стационарность и предположение о существовании и конечности двух первых моментов, введем обозначения:

-  $m = E[X_t]$  – среднее значение, или математическое ожидание;

-  $\sigma^2 = E[X_t - m]^2$  – дисперсия;

-  $R(k) = E[(X_{t+k} - m) \cdot (X_t - m)]$  – корреляционная функция;

-  $r(k) = \frac{R(k)}{R(0)} = \frac{R(k)}{\sigma^2}$  – коэффициент корреляции.

Под усреднением по шкале времени понимается переход процессу  $\{X^{(m)}\}$ , потому, что

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-m+1}^{km} X_i. \quad (2.2)$$

где  $X_i$  - наибольшее, возможное, для процесса разрешение.

Последующие эволюции процесса  $X^{(m)}$  могут быть получены путем  $m$ -усреднения процесса  $X_n$ , например

$$X_n^{(4)} = \frac{X_{4n-3} + X_{4n-2} + X_{4n-1} + X_{4n}}{4}. \quad (2.3)$$

Процесс  $X^{(m)}$  представляет собой менее детализированную копию процесса  $X_i$ . В случае, если статистические свойства (среднее, дисперсия) сохраняются при усреднении, тогда процесс является самоподобным.

При моделировании сетевого трафика значение  $X_k$  интерпретируется как число пакетов, поступивших в канал или сеть в течение  $k$ -го интервала времени. Исходный процесс при этом уже является усредненным.

Непрерывный стохастический процесс  $X(t)$  считается статистически самоподобным с параметром Херста  $H(0,5 \leq H \leq 1)$   $X(t)$ , если для любого положительного числа  $a$ , процессы  $X(t)$  и  $a^{-H}Z(at)$  будут иметь идентичные распределения, то есть иметь одинаковые статистические свойства.

На практике обычно встречаются не строго самоподобные, а асимптотически самоподобные процессы [12].

Процесс  $X$  является строго самоподобным в широком смысле (ССШС) с коэффициентом Херста  $H = 1 - \frac{\beta}{2}$ ,  $0 < \beta < 1$ , если выполняется условие  $r_m(k) = r(k)$ ,  $m \in \{2, 3, \dots\}$ .

Параметр  $H$  является индикатором степени самоподобия процесса, а также свидетельствует о наличии у него таких свойств как персистентность/антиперсистентность и длительная память. Для марковских процессов (без последействия) коэффициент Херста равняется 0,5. Процесс является полностью случайным, соответственно, простейший (Пуассоновский) поток еще называют «поток чистый случайности первого рода».

При  $H \in [0; 0,5]$  процессу свойственна антиперсистентность: высокие значения процесса идут за низкими и наоборот. То есть, вероятность того, что на  $k+1$  шаге процесс отклонится от среднего в противоположном направлении (относительно отклонения на  $k$  шаге), настолько велика, насколько параметр  $H$  близок к 0.

В случае  $H \in [0,5; 1]$  процесс является персистентным или с длительной памятью: если в течение какого-то времени в прошлом наблюдалось

увеличение параметров процесса, то и в будущем в среднем будет происходить их рост. Иными словами, вероятность того, что на шаге  $k+1$  процесс отклонится от среднего в том же направлении, что и на  $k$  шаге, настолько велика, насколько параметр  $H$  близок к 1.

Для того чтобы подтвердить существование свойства самоподобия для разных потоков данных мультисервисной сети, необходимо произвести измерения некоторых характеристик разных видов сетевого трафика. Для этого необходимы статистические данные о таких потоках, как аудио, видео и трафик данных.

То есть ССШС процесс не меняет свой коэффициент корреляции после усреднения по блокам длины  $m$ . Или  $X$  процесс является ССШС, если агрегированный процесс  $X(m)$  не отличим от исходного процесса  $X$ , как минимум в отношении статистических характеристик второго порядка.

Свойство асимптотически самоподобных процессов в широком смысле (АСШС) заключается в том, что при  $m$  стремящемся к бесконечности, процесс сходится к ССШС процессу  $r_m(k) \rightarrow r(k), m \rightarrow \infty$ .

Имеются наблюдения, что для обоих классов самоподобных процессов дисперсия  $V_{ar}[X^{(m)}]$  уменьшается намного медленнее чем  $\frac{1}{m}$  при  $m \rightarrow \infty$  по сравнению со стохастическими процессами, где дисперсия уменьшается пропорционально  $\frac{1}{m}$  и приближается к 0 при  $m \rightarrow \infty$ .

Наиболее точным свойством самоподобных процессов является то, что функция автокорреляции не вырождается при  $m \rightarrow \infty$ , в отличие от стохастических процессов, где при  $R(k, X) \rightarrow 0$  при  $m \rightarrow \infty$ .

Исследователи отметили одинаковость распределений исходного и агрегированного процессов, измерили параметр  $H$  и обнаружили, что для сетевого трафика показатель  $H$  находится в интервале  $(0,5; 1)$ . На качественном уровне такой трафик обладает высокой пачечностью (burstness) на многих масштабах временной оси. Коэффициент пачечности – отношение пиковой интенсивности процесса поступления заявок на обслуживание к его среднему значению. Параметр Херста  $H \in (0,5; 1)$  определяет степень самоподобия процесса. При  $H=0,5$  самоподобие отсутствует. Чем ближе этот параметр к единице, тем более ярко проявляются фрактальные свойства или довременная зависимость (long-range dependent, LRD) в процессе. Это обозначает, что если LRD процесс имеет тенденцию к увеличению (или уменьшению) в прошлом, то с большой вероятностью он будет иметь тенденцию к увеличению (или уменьшению) в будущем.

### 2.3 Основные свойства самоподобных процессов

Пример фрактала – кривая Коха относится к классу детерминированных фракталов, т.е. объект непосредственно составляется из своих малых копий. В теории телетрафика для описания поведения величины нагрузки в сетях связи с пакетной коммутацией применяется класс случайных (стохастических) фракталов. В этом случае свойство самоподобности (масштабной инвариантности) наблюдается лишь «в среднем», т.е. подобными являются не сами отсчеты сигнала, а его корреляционная функция, или ПРВ на разных временных масштабах [35].

Самоподобные процессы обладают гиперболически затухающим коэффициентом корреляции вида

$$r(k) = \frac{1}{2} \left( (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right), \quad (2.4)$$

или для асимптотически самоподобных процессов, корреляционной функцией

$$R(k) \approx k^{2H-2} L(k) \text{ при } k \rightarrow \infty. \quad (2.5)$$

где  $L(k)$  – медленно меняющаяся функция на бесконечности (то есть

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{L(tx)}{L(x)} = 1 \text{ для всех } x > 0).$$

Следовательно, корреляционная функция является несуммируемой – ряд, образованный последовательными значениями корреляционной функции, расходится. Это свойство характеризует практически все самоподобные процессы и отличает их от процессов без долговременной зависимости, у которых корреляционная функция убывает по показательному закону и суммируема.

Долговременная зависимость является причиной ярко выраженных пульсаций процесса, однако позволяет говорить о некоторой предсказуемости в небольших пределах времени. С точки зрения теории очередей, важным следствием коррелированности потока является неприемлемость оценок параметров очереди, основанных на предположении об одинаковом и независимом распределении интервалов во входящем потоке.

Самоподобные процессы обладают медленно убывающей дисперсией. При усреднении процесса дисперсия выборочного среднего затухает медленнее, чем величина, обратная размеру выборки, по закону:

$$\sigma^2(X^{(m)}) \propto m^{2H-2}, \text{ при } m \rightarrow \infty \quad (2.6)$$

в то время как для традиционных стационарных случайных процессов



$$\sigma^2(X^{(m)}) = \frac{1}{m} \sigma^2(X), \quad (2.7)$$

т.е. уменьшается обратно пропорционально объему выборки.

Свойство медленно убывающей дисперсии говорит о возможности существенных, не сглаживаемых усреднением, «выбросов» в случайном процессе, и связывает самоподобие с таким понятием, как распределения с весомами хвостами. Важное следствиесвойства медленно затухающей дисперсии состоит в том, что в случае классических статистических тестов (например, вычисление доверительных интервалов) общепринятая мера среднеквадратического отклонения  $\sigma$  является ошибочной.

С данным свойством связано и «нехарактерное» поведение индекса дисперсии, или индекса разброса, для отсчетов процесса (IDC), так же называемого фактором Фано. IDC определяется как отношение дисперсии числа событий на заданном временном интервале  $T$  к математическому ожиданию этой величины:

$$F(T) = \frac{\text{Var}[N(T)]}{E[N(T)]}. \quad (2.8)$$

где  $N(T)$  – число событий исследуемого потока, наступивших в интервале (окне)  $T$ .

Для самоподобных процессов логарифм индекса разброса  $F(T)$  линейно возрастает:

$$\ln[F(T)-1] = (2H-1)\ln T + y. \quad (2.9)$$

Самоподобные процессы обладают распределениями с тяжелыми хвостами. Случайная величина  $Z$  имеет распределение с тяжелым хвостом (РВХ), если вероятность  $P[Z > x] \sim cx^{-\alpha}$  при  $x \rightarrow \infty$ , т.е. хвост распределения затухает по степенному закону. Примером распределения с весомым хвостом является распределение Парето. При  $0 < \alpha < 2$  величина  $Z$  обладает бесконечной дисперсией, а при  $0 < \alpha < 1$  среднее значение также бесконечно.

Наиболее существенной особенностью случайной величины, обладающей распределением с тяжелым хвостом, является чрезвычайная изменчивость. С вероятностью, которая не является пренебрежимо малой, в выборке могут присутствовать некоторое число «очень больших» значений.

Такие распределения существенно снижают точность статистических оценок; конечный объем выборки приводит к заниженной оценке среднего и дисперсии. Наличие РВХ во внешних по отношению к рассматриваемым процессам явлениях является одной из причин возникновения самоподобия в соответствующих стохастических моделях. Часто при рассмотрении самоподобных процессов говорят о комплексе взаимосвязанных понятий: самоподобия, масштабировании, долговременной зависимости, РВХ и

степенных законах статистических характеристик. Этот комплекс свойств отличает процессы, называемые самоподобными, от классических случайных процессов, например, пуассоновского.

## 2.4 Описание модели самоподобного потока

Простейшим самоподобными объектами являются фракталы. По определению, данному бельгийским ученым Бенуа Мандельбротом: «фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому». Но с математической точки зрения фрактал – это, прежде всего, множество дробной размерности. Поэтому самоподобные процессы часто называют фрактальными.

Существует несколько подходов в формировании самоподобного потока. Наиболее известным является метод, первоначально предложенный Мандельбротом [13].

Данный метод основан на суперпозиции нескольких (строго чередующихся) независимых и имеющих одинаковое распределение ON/OFF источников, интервалы между ON и OFF периодами которого обладают эффектом Ноа (Noah effect). Под строго чередующимися ON/OFF источниками мы подразумеваем модель, где ON и OFF периоды строго чередуются, длительности ON периодов независимы и имеют одинаковое распределение, длительности OFF периодов тоже независимы и имеют одинаковое распределение, и последовательности длительностей ON и OFF периодов не зависят друг от друга.

При этом длительности ON и OFF периодов могут иметь разные распределения.

Эффект Ноа в распределении длительностей ON/OFF периодов является основной точкой при моделировании самоподобного трафика в отличие от моделей, когда используются стандартные экспоненциальное или геометрическое распределение. Эффект Ноа является синонимом синдрома бесконечной дисперсии, появившемуся благодаря эмпирическим наблюдениям того, что многие природные явления могут быть описаны распределением с бесконечной дисперсией.

Математически для достижения эффекта Ноа можно использовать распределение Парето или логарифмически-нормальное распределение, которые также часто называют *heavy-tailed distributions*.

Считается, что случайная величина имеет распределение с тяжелым (весомым) хвостом (РТХ или *Heavy Tailed*), если:

$$1 - F(x) \approx x^{-\alpha}, x \rightarrow \infty. \quad (2.13)$$

То есть хвост распределения затухает по степенному закону, в отличие от, например, Гауссовского распределения с экспоненциальным убыванием хвоста. Наиболее популярным является распределение Парето (рисунок 2.1).

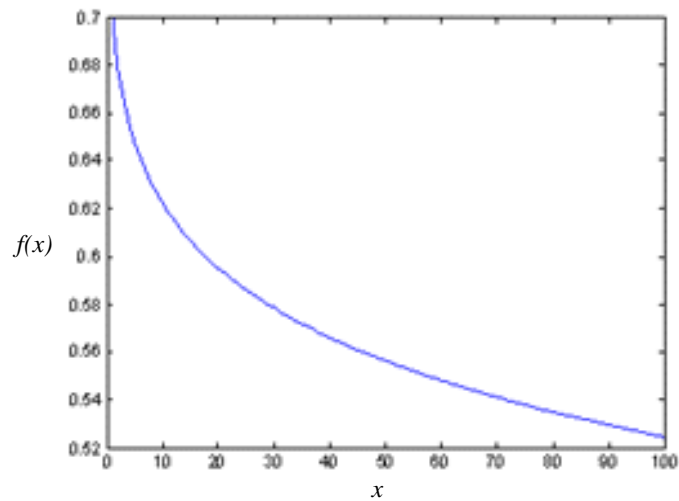


Рисунок 2.1 – Пример тяжелохвостого распределения

Считается, что сетевой трафик во многих случаях лучше всего описывается именно тяжелохвостым распределением.

Распределение Парето имеет функцию распределения:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha. \quad (2.14)$$

где  $\alpha$  – параметр формы, характеризующий, будет ли распределение иметь конечное или бесконечное среднее и дисперсию;

$\beta$  – параметр нижней границы (минимальное значение случайной величины  $x$ ).

Плотность распределения Парето задается функцией:

$$f(x) = 1 - \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha+1}, \quad x > \beta, \alpha > 0. \quad (2.15)$$

$$f(x) = F(x) = 0, \quad x \leq \beta. \quad (2.16)$$

Параметр  $\alpha$  определяет среднее и дисперсию  $x$  следующим образом:

- для  $\alpha \leq 1$  распределение имеет бесконечное среднее;
- для  $1 \leq \alpha \leq 2$  распределение имеет конечное среднее и бесконечную дисперсию;
- для  $\alpha \leq 2$  распределение имеет бесконечную дисперсию.

Также существует отношение между параметром  $\alpha$  и параметром Херста  $H$ :

$$H = \frac{3-\alpha}{2}. \quad (2.17)$$

Классическое распределение Парето используется при моделировании многих объектов рассматриваемого процесса, таких как размер дисковых файлов, WEB-страниц, пульсаций данных и т.д., отличительной особенностью которых является наличие так называемых «тяжелых хвостов» кривой распределения (НТ, heavy tail of distribution).

## 2.5 Выводы по второй главе

Выводами по второй главе является следующее:

- на основании обзора литературы видно, что описание современного трафика моделями M/M/1 и M/G/1 не полно;
- сетевой трафик имеет пульсации, он масштабноинвариантен;
- имеется проблема самоподобия (необходимо использовать модели G/G/1) и другие с тяжелохвостыми распределениями.

## 3 Исследование трафика

### 3.1 Классификация трафика в сетях телекоммуникаций

Современная тенденция конвергенции сетей различных типов привела к необходимости переноса сетью всех видов трафика, а не только традиционного для компьютерных сетей трафика приложений доступа к файлам и электронной почты.

Характеристики QoS особенно важны в случае, когда сеть передает одновременно трафик разного типа, например, трафик web-приложений и голосовой. Это связано с тем, что различные типы трафика предъявляют разные требования к характеристикам QoS. Добиться синхронного соблюдения характеристик QoS для всех видов трафика очень сложно, поэтому обычно используют следующий подход: классифицируют существующие в сети трафики, относя каждый из них к одному из распространенных типовых видов, а затем добиваются одновременного выполнения определенного подмножества из набора требований QoS.

К настоящему времени проделана определенная работа по классификации трафика приложений. В качестве основных критериев приняты три характеристики трафика:

- относительная предсказуемость скорости передачи данных;
- чувствительность трафика к задержкам пакетов и их вариациям;
- чувствительность трафика к потерям и искажениям пакетов.

Предсказуемость скорости передачи данных. В данном отношении трафик приложений можно условно разделить на два класса:

- потоковый (stream) – приложения с потоковым трафиком порождают равномерный поток данных, поступающий в сеть с постоянной битовой скоростью;

- пульсирующий (burst) – приложения с пульсирующим трафиком отличаются высокой степенью непредсказуемости, когда периоды молчания сменяются пульсацией, в течение которой пакеты «плотно» следуют друг за другом.

Чувствительность трафика к задержкам пакетов. Ниже перечислены основные типы приложений в порядке уменьшения чувствительности к задержкам пакетов:

- трафик реального времени включает в себя аудио- и видеoinформацию, критичную к задержкам при передаче. Допустимые значения задержек обычно не превышают 0,1 с. Кроме того, задержка должна иметь малые флуктуации (jitter);

- трафик транзакций. При передаче данного вида трафика задержки не должны превышать 1 с, иначе пользователи будут вынуждены прерывать работу и ждать ответа на свои сообщения, потому что только после получения

ответа они могут продолжить отправлять свои данные. В некоторых случаях превышение допустимого времени задержек приводит к сбою рабочей сессии;

- трафик данных. Задержки при передаче трафика этой категории могут иметь практически любые значения и достигать даже нескольких секунд. Для трафика данных полоса пропускания более важна, чем время задержек: увеличение пропускной способности сети влечет за собой уменьшение времени передачи. Приложения, передающие большие объемы данных, разработаны, в основном, так, что захватывают всю доступную полосу пропускания сети.

Чувствительность трафика к потерям и искажениям пакетов. Следует рассмотреть отдельно потери и искажения пакетов.

Приложения, чувствительные к потере данных. Практически все приложения, передающие алфавитно-цифровые данные обладают высокой чувствительностью к потере отдельных. Подобные потери часто ведут к полному обесцениванию остальной, успешно принятой информации. Все традиционные сетевые приложения (файловый сервис, сервис баз данных, электронная почта и т. д.) относятся к названному типу приложений.

К приложениям, устойчивым к потере данных, относятся приложения, передающие трафик с информацией об инерционных физических процессах, когда небольшое количество отсутствующих данных можно определить на основе принятых. К такому типу относится большая часть приложений, работающих с мультимедийным трафиком. Однако устойчивость к потерям имеет свои пределы, поэтому процент потерянных пакетов не может быть большим (не более 1 %).

Классификация на основе зависимости работоспособности приложения от задержки пакетов. Виды приложений:

- асинхронные – приложения, не имеющие ограничений на время задержки (приложения в которых передача данных выполняется в фоновом режиме - загрузка файлов, электронная почта);

- интерактивные – пользователь приложения может чувствовать дискомфорт, при возникновении задержек, но при этом приложение остается работоспособным;

- изохронные – приложения, в которых при превышении задержки некоторой величины нарушается работа приложения;

- сверхчувствительные – приложения, в которых при превышении задержки некоторой величины приложение перестает функционировать;

### **3.2 Характеристики простейшего потока событий**

Значительную часть теории очередей составляют методы определения характеристик СМО, находящихся под воздействием простейших потоков случайных событий.

Потоком событий называют последовательность событий, которые наступают в случайные моменты времени. Поток однородных событий называется простейшим, если он обладает следующими тремя свойствами:

- стационарность;
- отсутствие последствия;
- ординарность.

Стационарность – для любого положительного  $t$  ( $t > 0$ ) всегда существует такое  $k \geq 0$ , что вероятность появления  $k$  событий за период времени  $(a, a+t)$ , обозначим ее через  $p_k(t)$ , является одной и той же для всех  $a \geq 0$ . Для потоков, в которых за конечный промежуток времени с вероятностью 1 происходит конечное число событий, всегда выполняется равенство [36]:

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k(t) = 1 \quad (\forall t > 0) \quad (3.1)$$

Таким образом, сущность данного свойства заключается в постоянстве вероятностного режима во времени, или другими словами, вероятностные характеристики потока не зависят от времени.

Отсутствие последствия. Оно выражает собой отсутствие взаимной зависимости появления событий в потоке в непересекающихся между собой промежутках времени. В данном случае условная вероятность появления  $k$  событий (в зависимости от возможных вариантов чередования до начального момента времени  $a$ ) за промежуток времени  $(a, a+t)$  равняется безусловной вероятности  $p_k(t)$ . Таким образом, появление в потоке очередного события не зависит от чередования предшествующих моменту  $a$  событий и как давно произошло последнее из них.

Ординарность. Это означает, что вероятность появления в стационарном потоке за промежуток времени  $\Delta t$  более чем одного события является бесконечно малой величиной  $o(t)$  более высокого порядка чем  $\Delta t$ .

Простейшим потоком однородных событий называется всякий стационарный ординарный поток без последствия. Одной из характеристик потока случайных событий является его интенсивность – среднее число событий, происходящих в единицу времени. Основная задача теории простейшего потока состоит в определении закона распределения числа событий за период времени  $t$ , рассматриваемый в качестве случайной величины. Это соответствует задачи отыскания функции  $p_k(t)$ .

### 3.3 Потоки пакетов в мультисервисных сетях

Потоки пакетов (трафик) в мультисервисных пакетных сетях связи существенно отличаются от модели пуассоновского потока, описываемого экспоненциальной функцией распределения интервала времени между

моментами поступления пакетов. Здесь потоки пакетов формируются множеством источников запросов на предоставляемые сетью услуги и сетевыми приложениями, обеспечивающими услуги передачи видео, данных, речи и др.

Источники запросов, участвуя в процессе создания потока пакетов, существенно отличаются между собой значениями удельной интенсивности нагрузки.

Интенсивность нагрузки результирующего потока пакетов в каждый момент времени зависит от того, какими приложениями обслуживаются источники запросов и каково соотношение их численности для различных приложений. На структуру трафика также оказывают влияние и технологические особенности применяемых алгоритмов обслуживания. Например, если услуга обеспечивается несколькими приложениями, то моменты возникновения запросов на установление сеансов связи сильно коррелированы или если в используемых протоколах применяется повторная передача неверно принятых пакетов. Из-за этого в процессе обслуживания исходные потоки претерпевают значительные изменения и в итоговом трафике появляются долгосрочные зависимости в интенсивности поступления пакетов. Значит, трафик уже не является простой суммой множества независимых стационарных и ординарных потоков, что свойственно пуассоновским потокам телефонных сетей связи. Пакетный трафик является разнородным, а потоки разных приложений требуют обеспечения определенного уровня качества обслуживания. В этих условиях передачу потоков всех приложений обеспечивает единая мультисервисная сеть с общими протоколами и законами управления, при том, что источники каждого приложения имеют разные скорости передачи информации или изменяют ее в процессе сеанса связи (максимальная и средняя скорости). Из-за этого объединенному потоку пакетов свойственна пачечность (burstness) трафика со случайной периодичностью и продолжительностью пиков нагрузки.

С помощью программы-сниффер Wireshark в течение 4,5 часов проанализирован (измерен) сетевой трафик.

Программа Wireshark (Ethereal) – программа-анализатор трафика для компьютерных сетей и служит для анализа сетевых пакетов различных сетей. Программа позволяет просматривать весь проходящий по сети трафик в режиме реального времени, переводя сетевую карту в широковещательный режим. Функциональность у программы схожа с возможностями с tcpdump, однако Wireshark имеет графический пользовательский интерфейс, а так же гораздо больше возможностей по фильтрации и сортировке информации.

Wireshark – это приложение понимает структуру самых различных сетевых протоколов, и поэтому позволяет разобрать сетевой пакет, отображая значение каждого поля протокола любого уровня. Wireshark умеет работать с множеством форматов исходных данных, соответственно, можно открывать файлы данных, захваченных другими программами, что расширяет возможности захвата.



Его задача состоит в том, чтобы перехватывать сетевой трафик и отображать его в детальном виде. Wireshark работает на основе библиотеки Pcap (Packet Capture) позволяет создавать программы анализа сетевых данных, поступающих на сетевую карту компьютера. Программа также позволяет пользователю просматривать весь проходящий по сети трафик в режиме реального времени, сортировать его и фильтровать данные.

В таблице 3.1 представлен фрагмент измеренного сетевого трафика.

Т а б л и ц а 3.1 – Фрагмент измеренного сетевого трафика

№	Номер в Измер.трафике	Время	Наименование пакета
1	16	0.020687	MPEG PES_video-stream
2	37	0.047876	MPEG Audio_Layer_2[Malformed_Packet] 1
3	45	0.060576	MPEG PES_video-stream
4	48	0.069358	MPEG PES_video-stream
5	52	0.069802	MPEG PES_
...	...	...	...
29162	278506	589.370343	MPEG PES_
29163	278553	589.417032	MPEG PES_audio-stream

На рисунке 3.1 представлен результат измерений параметров трафика пакетной мультисервисной сети в Атырауском ОДТ, на котором показана зависимость количества пакетов протокола MPEG в единицу времени (одна минута) на интервале времени четыре часа тридцать минут.

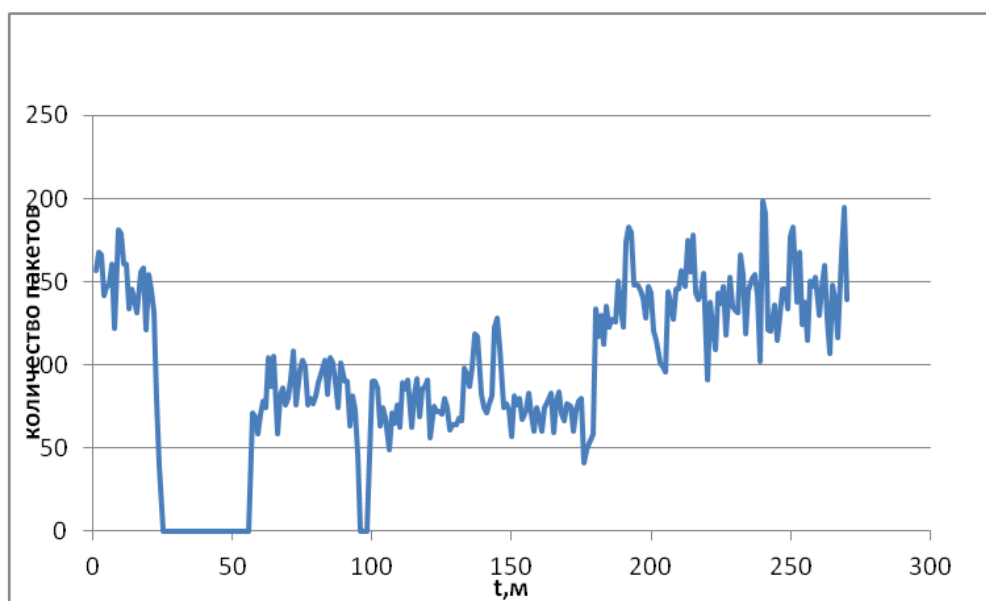


Рисунок 3.1 – Число пакетов в единицу времени (м)

Эти данные свидетельствуют о том, что для мультисервисного трафика характерна сильная неравномерность интенсивности поступления пакетов (наибольший выброс равен 205 пакетов, наименьший – 36). Всего измерено 25750 пакетов протокола MPEG. Пакеты не плавно рассредоточены по различным интервалам времени, а группируются в «пачки» в одних интервалах, или их очень мало в иных интервалах времени. Из-за этого в пачечном трафике при сравнительно небольшом среднем значении интенсивности поступления пакетов (интенсивность трафика) присутствует достаточное количество относительно больших выбросов. Генерирование информации в общем случае может быть представлено с помощью стохастического процесса  $B(t)$ .

Процесс передачи информации продолжается в течение времени сеанса связи  $T_c$ . Стохастический процесс передачи информации можно охарактеризовать в соответствии с рекомендациями ITU-T 1.311 максимальной (пиковой) битовой скоростью:

$$B_p = \max B(t). \quad (3.1)$$

Средняя битовая скорость передачи информации:

$$B_m = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} B(t) dt. \quad (3.2)$$

Соотношение между средней скоростью и пиковой скоростью определяет коэффициент пачечности:

$$K = \frac{B_p}{B_m}. \quad (3.3)$$

Средняя длительность пика  $\tau_n$  определяет среднее время непрерывной передачи по пиковой скорости в течение сеанса связи.

### 3.4 Исследование сетевого трафика

Показатели QoS определяются прямой зависимостью от характеристик входящего потока мультисервисной сети.

Сегодня IP-телефония из дополнительной услуги стала основной и включает в себя видеовызовы, многоточечные конференции разного типа (видео, аудио, Web), передачу сообщений, документов, контроль доступности абонентов, роуминг и др. В свою очередь технология IPTV, представляющая собой технологию доставки мультимедийных услуг (ТВ, аудио/видео, текст,

данные, графика) развивается на базе сетей IP в интерактивном режиме и в режиме вещания.

Каждый из многочисленных сервисов выдвигает свои требования к QoS и к каналу связи для полноценного функционирования. Поэтому продолжают исследования информационных потоков с целью обеспечения заданного уровня сервиса предоставляемым услугам.

Экспериментальные исследования и анализ многочисленных измерений информационных потоков на пакетном уровне указывают на специфическую природу процессов в компьютерных сетях, не укладывающуюся в традиционные рамки известных случайных моделей. Это объясняется многочисленными исследованиями, проводимыми в настоящее время с целью изучения влияния различных факторов, приводящих к возникновению сложных сетевых процессов. Характерным для описания процессов передачи данных пакетным трафиком являются обнаруженные на практике свойства самоподобия или масштабной инвариантности статистических характеристик. Эти свойства связывают с особым классом физических процессов – фрактальными процессами [37].

В самоподобном трафике присутствует некоторое количество достаточно сильных выбросов на фоне относительного низкого среднего уровня, что значительно увеличивает задержки и джиттер при прохождении самоподобного трафика через сеть, даже в случаях, когда средняя интенсивность трафика намного ниже потенциально достижимой скорости передачи в данном канале. Пакетизированные данные из-за их пачечного характера и нелинейной природы трудны для моделирования и предсказания при использовании классических моделей. Многочисленные измерения трафика во всех странах мира используются для получения статистических характеристик, необходимых для выработки стратегий по качеству обслуживания и управления сетью. В результате этих исследований появилась возможность сравнения ранее используемых классических моделей и методов, основанных на измерениях реального трафика.

Анализ фрактальных свойств временных рядов является одним из перспективных направлений анализа данных [38]. Объемы сообщений в информационных потоках образуют временные ряды. Временной ряд (лаг) – разрыв во времени между двумя или несколькими событиями, находящимися в причинно-следственной связи.

Для исследования временных рядов сегодня используется теория фракталов.

Имеются различные методы анализа временных рядов:

- метод агрегирования процесса;
- метод DFA (Detrended Fluctuation Analysis) является одним из универсальных подходов к выявлению самоподобия;
- корреляционный анализ;
- фактор Фано и другие.

### 3.5 Оценка статистических характеристик сетевого трафика

Осуществим оценки статистических характеристик распределения пакетов протокола MPEG.

Рассчитаем интервалы между поступлениями пакетов. В таблице 3.2 представлены данные расчетных интервалов между пакетами.

Т а б л и ц а 3.2 – Интервалы между пакетами протокола MPEG

№	Интервал	№	Интервал	№	Интервал	№	Интервал
1	0,027189	6	0,008155	11	0,016522	16	0,002534
2	0,0127	7	0,000518	12	0,018248	17	0,00172
3	0,008782	8	0,00167	13	0,013483	18	0,031059
4	0,000444	9	0,022147	14	0,01122	19	0,002476
5	0,017953	10	0,013131	15	0,010419	20	0,014141

На рисунке 3.2 представлен временной ряд зависимости интервалов между пакетами и соответствующий номер пакета.

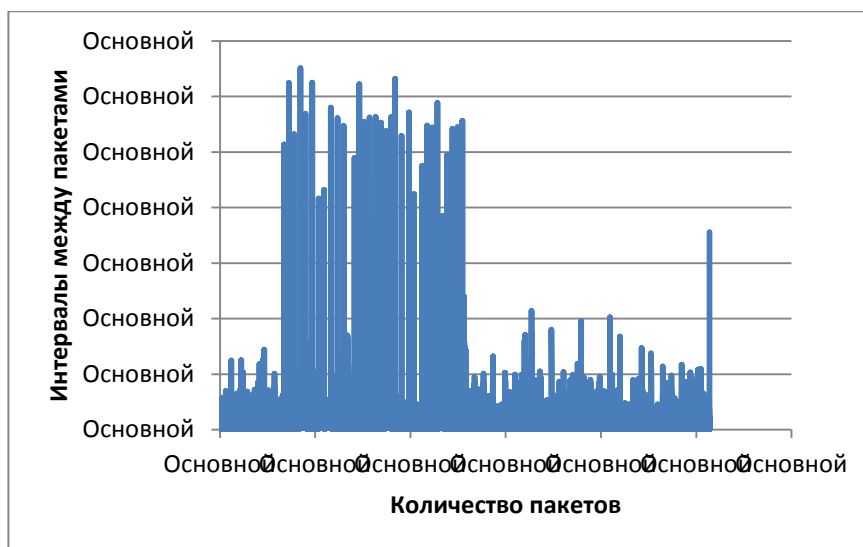


Рисунок 3.2 – Зависимость интервалов между пакетами от их количества

Из рисунка 3.2 видно, что наряду с многочисленными минимальными интервалами имеются и большие интервалы между пакетами. Поток пакетов имеет сгустки (характеризуется определенным уровнем пачечности). Вычислим числовые значения математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения и коэффициент вариации по формулам [39]

$$m_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.4)$$

$$D_t = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3.5)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.6)$$

$$v = \frac{\sigma_t}{m_t}. \quad (3.7)$$

Для простейшего потока характерно следующее:  $\sigma = \frac{1}{\lambda}, \tau_{\text{инт}} = \frac{1}{\lambda}, v = 1$ .

Коэффициент вариации – характеристика, отражающая степень неравномерности поступления заявок.

Вероятностно-временные характеристики распределения интервалов между пакетами MPEG имеют следующие числовые значения:

- математическое ожидание равно значению 0,0229;
- дисперсия равно значению 0,189;
- среднеквадратическое отклонение равно значению– 0,4347.

Анализ вычисленных значений показывает, что это распределение не экспоненциальное, так как значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения не равны между собой.

### 3.6 Исследование трафика на самоподобие методом агрегирования

В [40] описано, что существуют два класса фрактальных процессов:

- точно самоподобные;
- асимптотически самоподобные процессы.

Процесс  $X$  называется точно самоподобным с параметром  $\beta(0 < \beta < 1)$ , если выполняются условия:

$$D_m = \frac{D}{m^\beta}, \quad (3.8)$$

где  $D$  - дисперсия процесса  $X$ .

$D_m$  - дисперсия процесса  $X^{(m)}$ , полученного уменьшением размера шкалы наблюдений  $X$  в  $m$  раз.

Автокорреляционная функция сохраняется на всех масштабах:

$$R(k, X^{(m)}) = R(k, X). \quad (3.9)$$

Процесс  $X$  называется асимптотически самоподобным если для больших  $k$  выполняются условия

-  $D_m = \frac{D}{m^\beta}$ , полученного уменьшением размера шкалы наблюдений  $X$  в  $m$  раз. Параметр  $\beta$  связан с параметром Хёрста  $H$  соотношением

$$\beta = 2(1 - H). \quad (3.10)$$

Автокорреляционная функция сохраняется при  $m \rightarrow \infty$ :

$$R(k, X^{(m)}) \rightarrow R(k, X). \quad (3.11)$$

Наиболее точным свойством самоподобных процессов является то, что АКФ не вырождается при  $m \rightarrow \infty$ , в отличие от стохастических процессов, где  $R(k, X) \rightarrow 0$  при  $m \rightarrow \infty$ .

Осуществим процедуру агрегирования процессов промежутков между поступлениями пакетов MPEG с целью выявления визуальных свойств самоподобия сетевого трафика.

На рисунке 3.3 показан агрегированный ряд, выполненный путем уменьшения размера шкалы наблюдений в два раза.

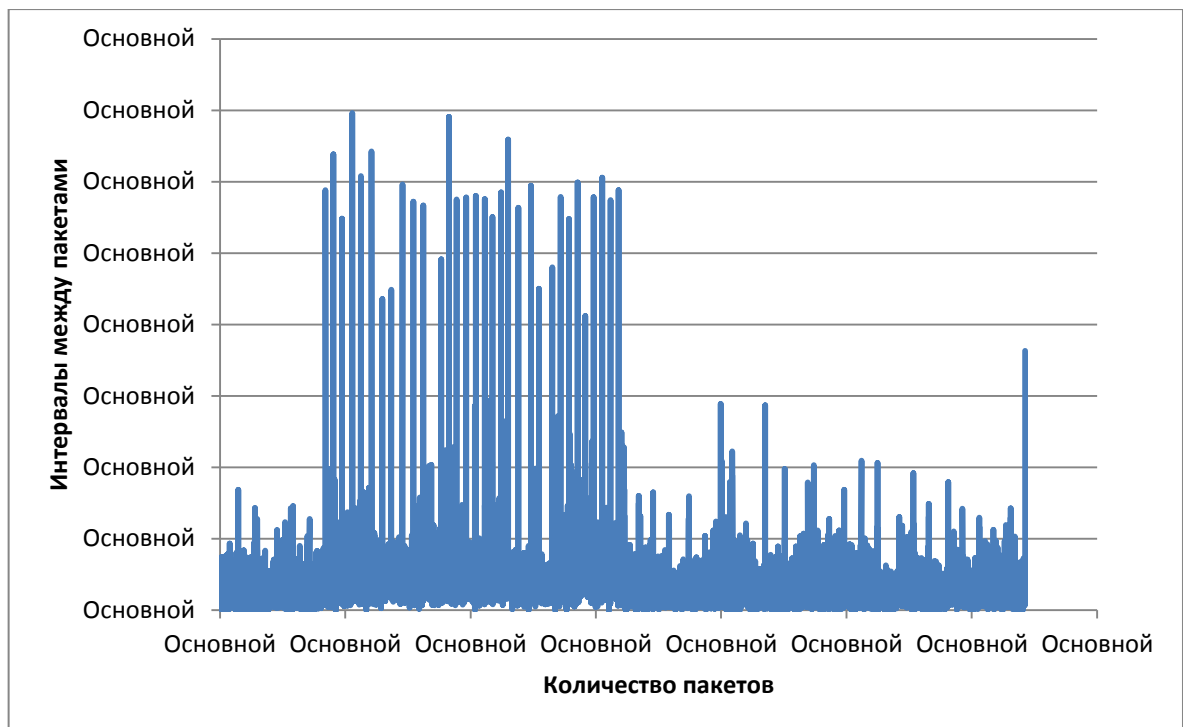


Рисунок 3.3 – График агрегированного процесса  $m=2$

На рисунке 3.4 показан агрегированный ряд, выполненный путем уменьшения размера шкалы наблюдений в четыре раза.

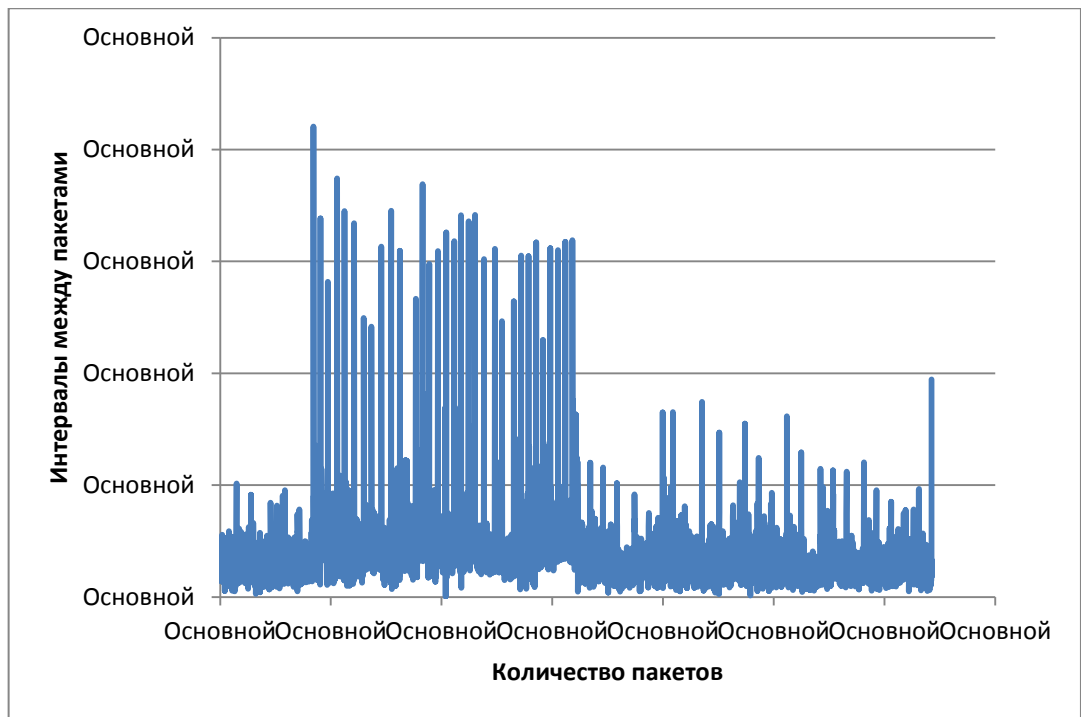


Рисунок 3.4 – График агрегированного процесса  $t=4$

Далее процесс агрегирования продолжен в шесть и десять раз. На рисунках 3.5 и 3.6 представлены полученные графики соответственно.

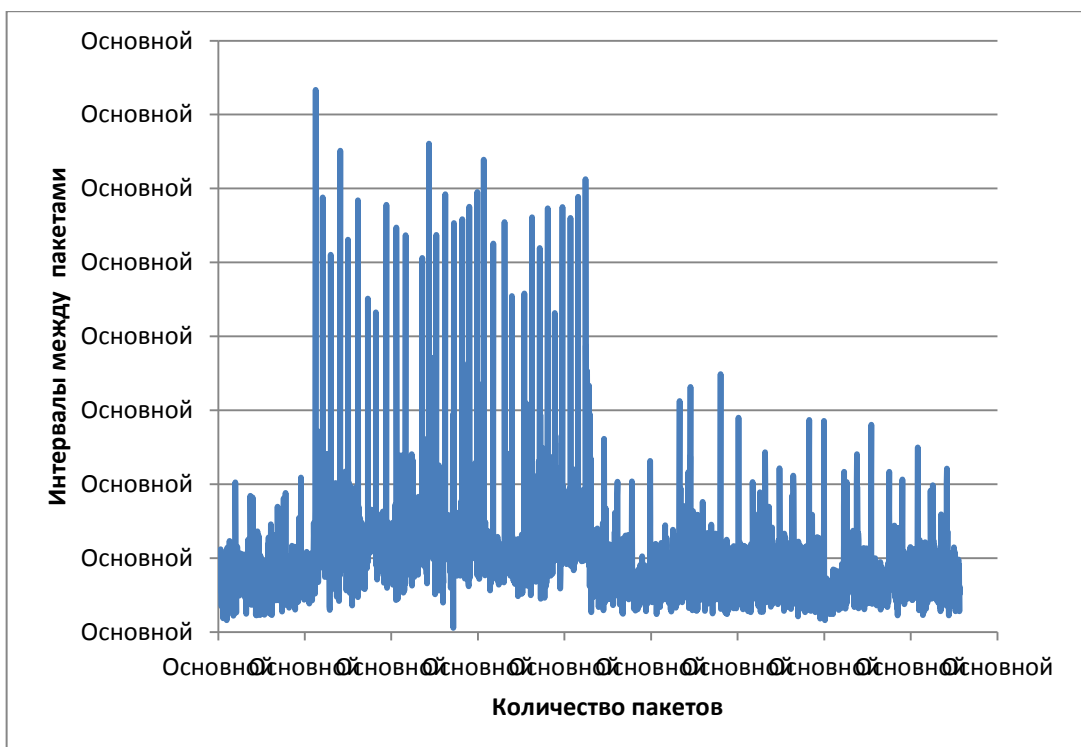


Рисунок 3.5 – График агрегированного процесса  $t=6$

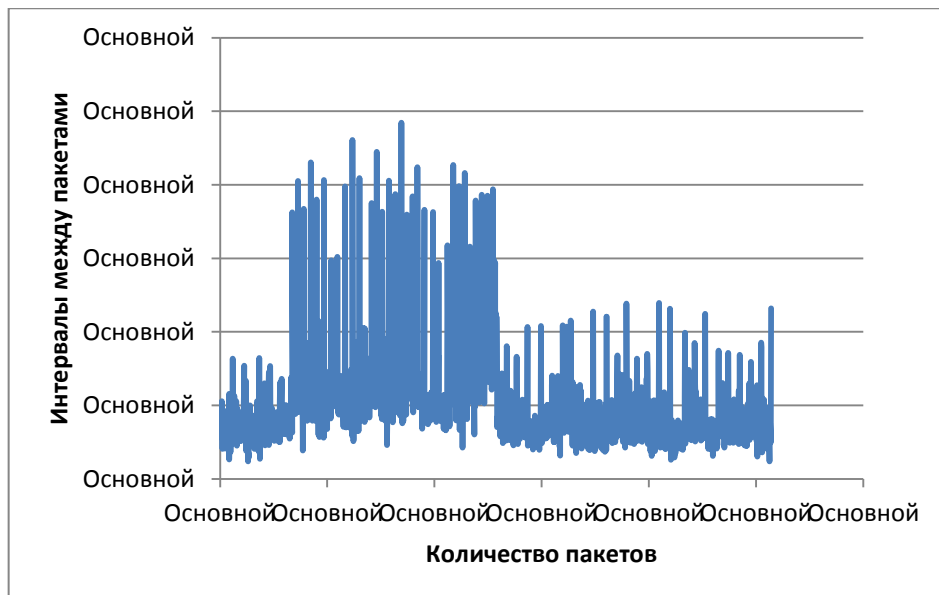


Рисунок 3.6 – График агрегированного процесса  $m=10$

Из рисунков 3.3, 3.4, 3.5 и 3.6 видно, что с увеличением интервала агрегирования временного ряда сохраняется его самоподобная структура.

Логарифмируя выражение (3.8), получим

$$\ln(D_{x^m}) = \ln(D_x) - \beta \cdot \ln(m). \quad (3.9)$$

Результаты вычисления дисперсий  $Dm$  каждого агрегированного временного ряда приведены в таблице 3.3.

Т а б л и ц а 3.3 – Дисперсия  $Dm$  агрегированных рядов

$m$	$Dm$	$\ln(m)$	$\ln(Dm)$
1	0,189	0	-1,666008
4	0,071	1,386294	-2,645075
6	0,047	1,791759	-3,057607
8	0,095	2,079442	-2,350725
10	0,032	2,302585	-3,438899

Из таблицы 3.3 видно выполнение агрегационного процесса уменьшением размера шкалы наблюдений в 4, 6, 8 и 10 раз.

Для получения данных дисперсии соответствующей шкалы наблюдений сформирован новый ряд, полученный при помощи нахождения среднего каждых четырех, шести, восьми и десяти исходных значений наблюдений. Далее вычислен логарифм этих же данных, необходимых для построения графика зависимости  $\ln(D_x)$  от  $\ln(m)$  и линии тренда, как показано на рисунке 3.7. Определим аппроксимированное значение  $\beta$ ,  $\beta=0,618$ . Параметр  $\beta$  связан с показателем Херста  $H$  как в 3.10



$$H = 1 - \frac{\beta}{2} = 1 - \frac{0,618}{2} = 0,69.$$

Так как показатель  $H > 0,5$ , то степень устойчивости долгосрочной зависимости исследуемого временного ряда выше среднего и ряд является самоподобным (фрактальным).

Фрактальная размерность  $D$  временного ряда связана с показателем степени его фрактальности (показателем Херста)  $H$  формулой

$$H = 2 - D. \quad (3.10)$$

где  $D$  – фрактальная размерность.

$$D = 2 - H = 2 - 0,69 = 1,31.$$

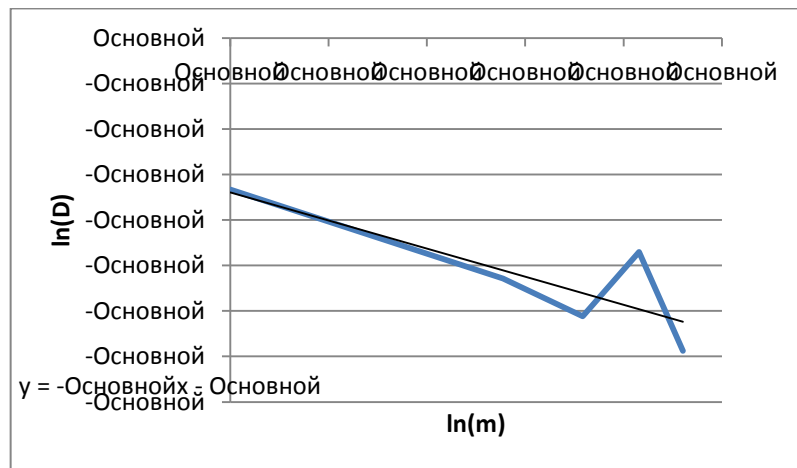


Рисунок 3.7 – Линия тренда для определения  $\beta$

Параметры самоподобия  $H$  и  $D$  представляют собой меры устойчивости статистического явления или меры длительности долгосрочной зависимости стохастического процесса.

### 3.7 Выводы по третьей главе

#### Выводы

- исследованием интервалов пакетов протокола MPEG подтверждает одно из свойств самоподобия (масштабной инвариантности) осуществленное методом агрегирования ( $m=4; 6; 10$ );
- важнейший параметр, характеризующий степень самоподобия  $H$  больше 0,5 и равен 0,69;
- ряд персистентный с фрактальной размерностью равной  $D=1,31$ .

## 4 Моделирование в среде GPSS World

### 4.1 Имитационная модель

Имитационная модель – это формальное описание логики функционирования исследуемой системы во времени, учитывающее наиболее существенные взаимодействия ее элементов и обеспечивающее возможность проведения статистических экспериментов.

Имитационная модель СМО – это модель, отражающая поведение системы и изменения ее состояния во времени при заданных потоках требований, поступающих на входы системы.

Имитационное моделирование – это численный метод определения параметров функционирования различных систем по многочисленным реализациям с учетом вероятностного характера протекания процесса. Основой имитационного моделирования является метод статистических испытаний – метод Монте-Карло. Этот метод наиболее эффективен при исследовании сложных систем, на функционирование которых оказывают существенное влияние случайные факторы.

Имитационное моделирование позволяет исследовать СМО при различных типах входных потоков и разной интенсивности поступления требований в систему, а также различных дисциплинах обслуживания требований. Дисциплина обслуживания – правило, по которому заявки поступают из очередей на обслуживание. Величина, характеризующее право на первоочередное обслуживание, называется приоритетом. В моделях СМО заявки, приходящие на вход занятого ОА, образуют очереди, отдельные для заявок каждого приоритета. При освобождении ОА на обслуживание принимается заявка из непустой очереди с наиболее высоким приоритетом.

Для описания моделей СМО при их исследовании на ЭВМ разработаны специальные языки имитационного моделирования. Одним из наиболее эффективных и распространенных языков моделирования сложных дискретных систем является в настоящее время язык GPSS. Он может быть использован для моделирования систем, формализуемых в виде систем массового обслуживания. В качестве объектов языка используются аналоги таких стандартных компонентов СМО, как заявки, обслуживаемые приборы, очереди и т.п. Достаточный набор подобных компонентов позволяет конструировать сложные имитационные модели, сохраняя привычную терминологию СМО [41].

Система моделирования GPSS World основана на переходе требований (транзактов) от блока к блоку (от оператора к оператору) в определенные моменты времени, что называется событием. Продолжительность моделирования определяется не длительностью интервалов между событиями,

а числом событий, возникающих в системе. Поэтому переход на более мелкие единицы времени не увеличивает время моделирования.

СМО широко использует аппарат теории вероятностей и (в меньшей степени) математической статистики. Задачи СМО, сформулированные математически, обычно сводятся к изучению специального типа случайных процессов. Исходя из заданных вероятностных характеристик поступающего потока вызовов и продолжительности обслуживания и учитывая схему системы обслуживания (наличие отказов или очередей и т. п.), СМО определяет соответствующие характеристики качества обслуживания (вероятность отказа, среднее время ожидания начала обслуживания, среднее время простоя линий связи и т. д.).

Модель СМО, положенная в основу языка GPSS, представляет собой следующее. Имеется система (маршрутизатор), одноканальное устройство, которое осуществляет обслуживание заявок, или транзакций. Заявки перемещаются по системе, занимая обслуживающие устройства, т.е. задерживаясь в этих устройствах на обслуживание. Траектория движения заявок по системе может быть разной, в зависимости от вида заявок и от значений случайных и расчетных параметров, которые рассчитываются заявками в процессе их движения по системе. В принципе, заявки вводятся в систему специальными блоками через заданные промежутки времени, которые могут быть и случайными. Заявки рано или поздно должны быть удалены из системы. Процесс моделирования завершается в тот момент, когда последняя заявка покинет систему.

Заявки конкурируют между собой за ресурсы системы, и в первую очередь за устройства. Поэтому в системе возникают очереди из заявок, претендующих на один и тот же ресурс. Появление очередей, изменение их длины и другие события фиксируются системой моделирования автоматически, а при окончании моделирования выводятся в едином отчете, позволяющем оценить статистические параметры функционирования системы и на основании их оценить, подходит ли получившаяся система под заданные в техническом задании условия, или нет. В общем виде СМО может быть представлена, как показано на рисунке 4.1.

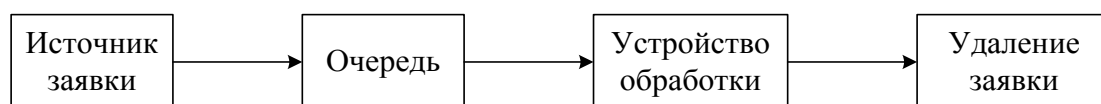


Рисунок 4.1 – Представление в виде СМО

В качестве исходных данных задается интенсивность входного потока заявок, который представляет собой пуассоновский простейший поток.

## 4.2 Имитационная модель поступающего пуассоновского простейшего потока на маршрутизатор

Чтобы задать входящий поток требований на сетевое устройство, необходимо описать моменты времени их поступления в систему (закон поступления) и количество требований, которое поступило одновременно. В общем случае входящий поток требований описывается распределением вероятностей интервалов времени между соседними требованиями. Часто предполагают, что эти интервалы времени независимые и имеют одинаковое распределение случайных величин, которые образуют стационарный входящий поток требований. Классическая теория массового обслуживания рассматривает пуассоновский (простейший) поток требований. Распределение числа вызовов во времени для простейшего потока характеризуется законом Пуассона, а распределение длительности промежутков между вызовами подчинено экспоненциальному закону.

Для этого потока число требований  $k$  для любого интервала времени распределено по закону Пуассона:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}, k \geq 0, t \geq 0. \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока требований (число требований за единицу времени).

Для пуассоновского входного потока будет достаточно буферов умеренного размера: очередь может образоваться в очень короткие промежутки времени (доли миллисекунд), а за долгий период времени буферы очистятся.

Для исследования работы маршрутизатора (как одноканального устройства) разработана имитационная модель в программной среде GPSS World. При этом входной поток представляет собой пуассоновский простейший поток.

Имитационная модель приведена в приложении А при этом плотность поступающих пакетов соответствует экспоненциальному вероятностному распределению [42].

В этой модели использовались следующие блоки языка GPSS [43, 44, 45, 46]:

- блок `generate` является источником потока сообщений в модели. В данном блоке производится подготовка сообщений, и запуск их в модель через интервалы времени, распределенные по экспоненциальному закону. `Generate (exponential(1,0,100))` – интервал времени между транзактами величина случайная со средним значением 100. Параметры процедуры `Exponential` имеют следующий смысл: первый параметр – номер встроенного генератора равномерно распределённых в интервале (0; 1) случайных чисел; второй и

третий параметр соответственно смещение (минимальное значение) и среднее значение (математическое ожидание) случайной величины, распределённой по экспоненциальному закону;

- блок `advance` задерживает продвижение сообщения на заданный период времени;

- блок `test` не изменяет никаких атрибутов сообщения; он определяет номер следующего блока для вошедшего в него сообщения в зависимости от того, выполняется требуемое условие или нет. Блок управляет потоком сообщений, проверяя выполнение алгебраических отношений;

- свободный блок `seize` позволяет вошедшему в него сообщению занять указанное устройство. Блок `seize` задерживает сообщение, если устройство занято или находится в состоянии недоступности;

- блок `release` предназначен для освобождения устройства тем сообщением, которым оно было занято. Если сообщение обрабатывается устройством, то с помощью блока `release` оно освобождает устройство и переходит к следующему последовательному блоку. Если сообщение обрабатывалось устройством, но не было прервано, то блоком `RELEASE` сообщение удаляется из списка прерывания устройства и пытается вновь занять устройство;

- блок `queue` увеличивает длину очереди;

- блок `depart` служит для уменьшения длины очереди;

- блок `assign` заменяет, увеличивает или уменьшает текущее значение параметра транзакта на заданное значение;

- блок `transfer` (передать) предназначен для передачи входящего в него транзакта в любой другой блок модели. Все режимы блока `transfer`, кроме безусловного, выборочные, то есть отличаются друг от друга способом выбора очередного блока, к которому должен быть направлен активный транзакт, операнд `A` задает этот режим выбора;

- блок `link` служит для ввода транзактов в список пользователя (ввести в список), который может быть использован в режимах: условном и безусловном;

- блок `unlink` служит для вывода одного или нескольких транзактов из списка пользователя и помещения их обратно в список текущих событий

- блок `savevalue` означает сохраняемая величина;

- блок `terminate` удаление транзактов из модели.

Отчет программы представлен в приложении Г.

Описание элементов файла статистики:

- `START TIME` – абсолютное системное время в момент начала моделирования. Оно эквивалентно абсолютному системному времени, после последнего применения операторов `RESET` или `CLEAR`;

- `END TIME` – абсолютное время, когда счетчик завершений принимает значение 0;

- `BLOCKS` – количество блоков, использованных в текущей модели, к моменту завершения моделирования;

- FACILITIES – количество устройств, использованных в модели, к моменту завершения моделирования;
- STORAGES – количество многоканальных устройств, использованных в текущей модели к моменту завершения моделирования;
- поле FACILITY определяет номер или имя объекта типа «устройство»;
- поле ENTRIES определяет количество раз, когда устройство было занято или прервано после последнего выполнения блоков RESET или CLEAR или с начала работы программы;
- поле UTIL. определяет часть периода моделирования, в течение которого устройство было занято;
- поле AVAILABLE определяет состояние готовности устройства в конце периода моделирования. Оно равно 1, если устройство готово и 0 - если не готово;
- поле OWNER определяет номер последнего сообщения, занимавшего устройство. 0 означает, что устройство не занималось;
- поле PEND определяет количество сообщений, ожидающих устройство, находящееся в «режиме прерывания»";
- поле INTER определяет количество сообщений, прерывающих устройство в данный момент (счетчик сообщений в списке прерывания);
- поле RETRY определяет количество сообщений, ожидающих специальных условий, зависящих от состояния объекта типа «устройство»;
- поле DELAY определяет количество сообщений, ожидающих занятия устройства;
- поле QUEUE определяет имя или номер объекта типа «очередь»;
- поле MAX определяет максимальное содержимое объекта типа «очередь» в течение периода моделирования, который начинается с начала работы программы или с последнего оператора RESET или CLEAR;
- поле CONT определяет текущее содержимое объекта типа «очередь» в конце периода моделирования;
- поле ENTRIES определяет общее количество входов в очередь в течение периода моделирования (счетчик входов);
- поле ENTRIES(0) определяет общее количество входов в очередь с нулевым временем ожидания (счетчик «нулевых» входов);
- поле AVE.CONT определяет среднее значение содержимого очереди;
- поле AVE.TIME определяет среднее время, проведенное в очереди с учетом всех входов в очередь;
- поле AVE.(-0) определяет среднее время, проведенное в очереди без учета «нулевых» входов в очередь;
- поле Userchain (цепь пользователя) приводится информация о наличии транзактов в цепи пользователя, в которую транзакты помещаются принудительно при выполнении определенных условий).

Отче программы приведен в приложении Б.

### 4.3 Итоги результатов моделирования

После полного прогона модели с изменением величины загрузки устройства транзактами, распределенными по экспоненциальному закону, поступающему на маршрутизатор.

Для определения среднего времени ожидания сведем данные результатов моделирования в таблицу 4.1.

Т а б л и ц а 4.1 – Результат работы программы

load	Ave.cont	Ave.time	Ave.(-0)
0,5	0,364	1,98	2,486
0,6	0,705	1,98	3,133
0,738	1,192	3,106	4,038
0,891	2,715	5,749	6,218
0,993	13,383	20,896	21,225

На рисунке 4.2 представлена зависимость среднего значения содержимого в очереди (Ave.cont) от загрузки маршрутизатора.

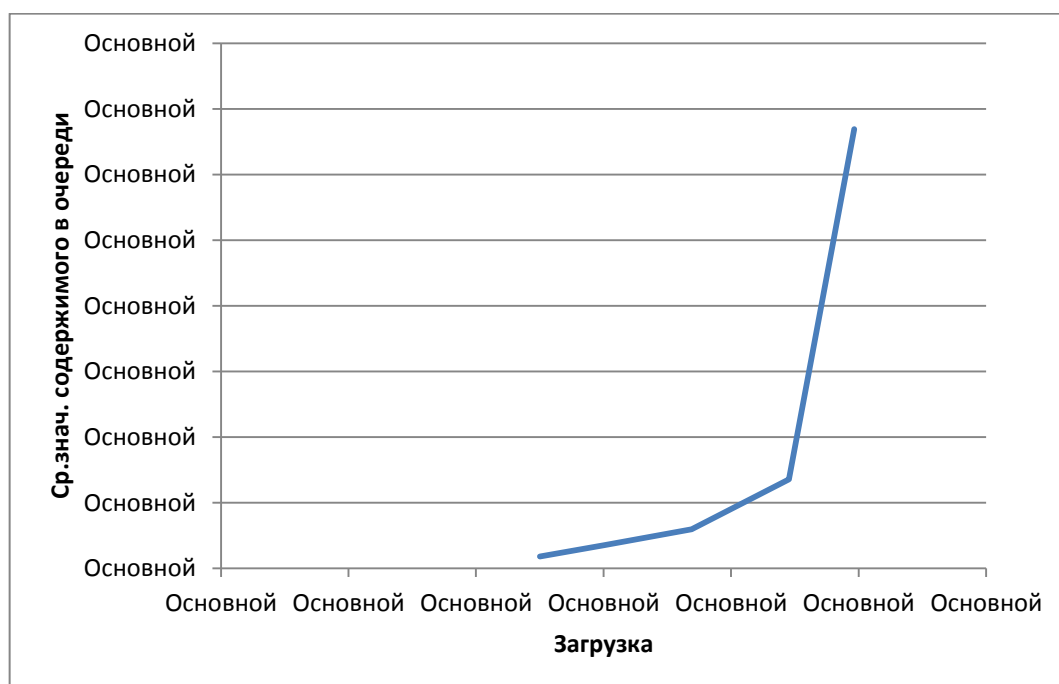


Рисунок 4.2 – Содержимое очереди

На рисунке 4.3 представлена зависимость среднего времени ожидания в очереди (Ave.time) от загрузки маршрутизатора.



Рисунок 4.3 - Зависимость среднего времени ожидания в очереди от загрузки

На основании вышеописанного, видно, что содержимое очереди и среднее время ожидания в очереди увеличиваются когда загрузка превышает 0,9. Устройство рассчитано на поступление транзактов, распределенных по экспоненциальному закону.

#### 4.4 Имитационная модель поступающего потока по распределению закона Парето

Многочисленные исследования процессов в сети Интернет показали, что статистические характеристики трафика обладают свойством временной масштабной инвариантности (самоподобием) [47].

Простейшим самоподобными объектами являются фракталы [48]. Согласно определению Мандельброта: «фрактал – структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому». Неформально самоподобный процесс определяется как случайный процесс, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабирования.

Строго самоподобный в широком смысле процесс (ССШП) характеризуется инвариантностью АКФ при изменении уровня агрегирования при условии медленно убывающей зависимости (МУЗ).

В отличие от пуассоновских процессов самоподобные характеризуются наличием последствия: вероятность поступления следующего (очередного) события зависит не только от времени, но и от предыдущих событий (предыстории). Это означает, что число текущих событий может зависеть от числа предыдущих событий в отдаленные промежутки времени. Поэтому одним из основных свойств самоподобного процесса (self similar) является



МУЗ (long range dependency). Поэтому самоподобные процессы часто называют фрактальными. Это связано с процессами обработки сетевых устройствах, разными объемами данных, с появлением множества новых приложений и др. Было замечено, что не всегда поток пакетов в сети можно моделировать с использованием Пуассоновского процесса. Самоподобный процесс часто носит взрывной (burst) характер, что выражается в возможности наличия выбросов во время относительно низкой скорости поступления событий.

Для представления свойства самоподобных потоков предлагаются модели со следующими распределениями [49]: логарифмически-нормальное, Вейбулла (W), Парето (P). При математическом моделировании используют различные модели распределений, среди них в основном распределение Парето, которое имеет следующий вид:

$$w(x) = \frac{\alpha \cdot k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \alpha > 0, k > 0, x > 0. \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  - параметр формы;

$k$  - параметр, определяющий нижнюю границу для случайной величины.

Параметр  $\alpha$  связан с показателем Херста  $H$  выражением:

$$\alpha = 3 - 2H \quad (4.3)$$

Для исследования и сравнения зависимостей среднего времени ожидания в очереди пакетов от загрузки осуществлено имитационное моделирование поступления пакетов с распределением длительности промежутков между пакетами по закону Парето в объектно-ориентированной программе GPSS World. Имитационная модель самоподобного случайного процесса представлена в приложении В.

В данной модели блок generate является источником потока сообщений распределенных по закону Парето. Generate (Pareto(1,k,a)) – параметры процедуры по закону Парето имеют следующий смысл: первый параметр – номер встроенного генератора используется в качестве аргумента для формирования случайных величин с заданным законом распределения и остальные два параметра задают непосредственно параметры вероятностного распределения. Применительно к трафику самоподобие выражается в неизменности поведения при изменении временных масштабов наблюдения и сохранения склонности к всплескам при усреднении по шкале времени.

Так как расчетные данные показали  $H=0,69$  то альфа равна 1,6.

Отчет программы приведен в приложении Г.

## 4.5 Итоги результатов моделирования

После полного прогона моделей выходная информация представлена в таблице 4.2 (распределение Парето с  $\alpha=1,6$  и  $H=0,69$ ).

Т а б л и ц а 4.2 – Выходная информация при  $\alpha=1,6$  и  $H=0,7$

load	Ave.cont	Ave.time	Ave.(-0)	load	Ave. cont	Ave. time	Ave.(-0)
0,7	0,273	0,272	1,512	0,9	13,306	13,223	16,285
0,8	1,866	1,854	3,883	0,95	54,02	53,681	57,372

На рисунке 4.4 построена зависимость среднего времени ожидания в очереди от загрузки транзактов (пакетов), распределенных по закону Парето.

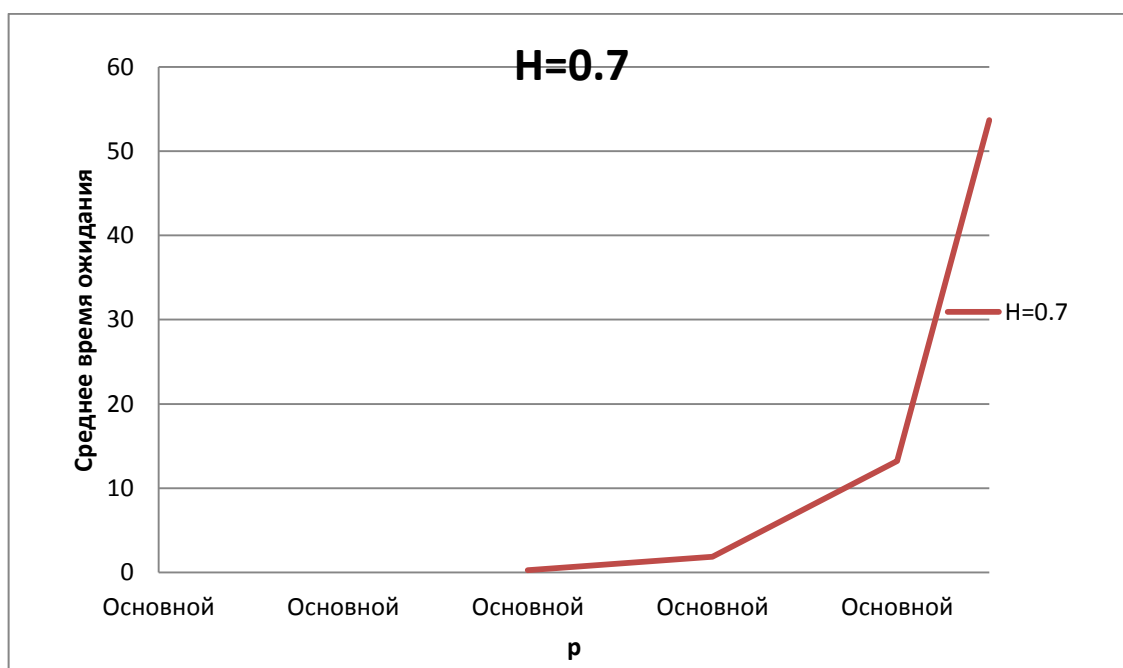


Рисунок 4.4 – Зависимость среднего времени ожидания от загрузки

Из рисунка 4.4 видно, что среднее время ожидания в очереди начинает расти при загрузке начиная выше 50%, а при выше 90% резко увеличивается очередь.

На рисунке 4.5 построены для сравнения зависимости среднего времени ожидания в очереди от загрузки транзактов (пакетов), распределенных по экспоненциальному и закону Парето.

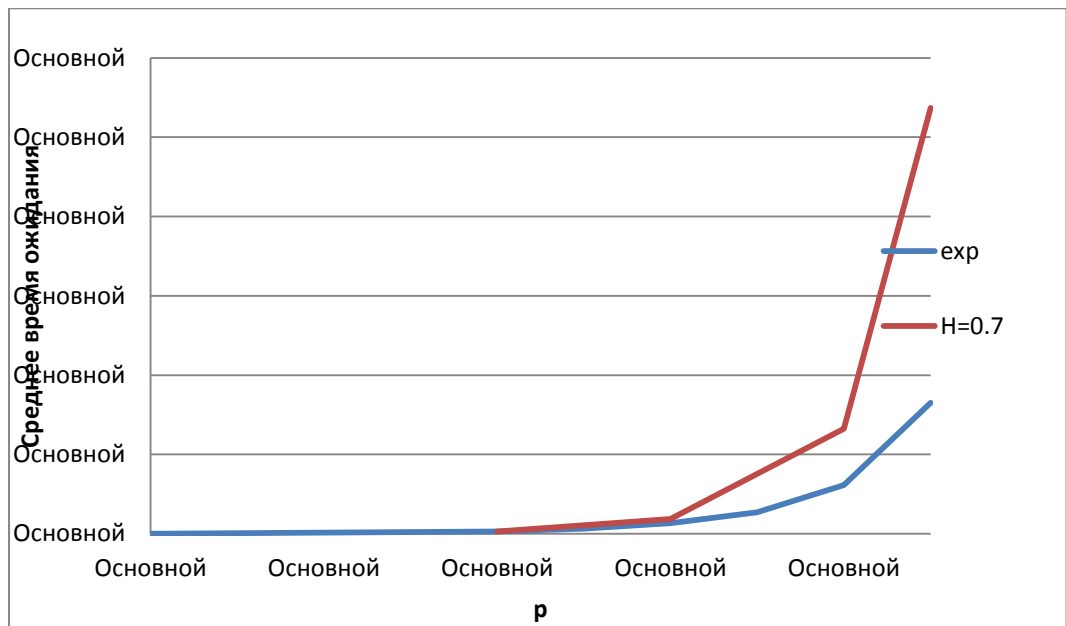


Рисунок 4.5 – Зависимость времени ожидания в очереди от коэффициента загрузки системы

#### 4.6 Выводы по четвертой главе

Выводами является следующее;

- на основании, проведенных исследований имитационных моделей выявлено, что среднее время ожидания пакета в очереди растет быстрее при самоподобном трафике нежели при простейшем;
- необходимо учитывать свойства самоподобия при проектировании и разработке сетевых устройств;
- сетевое устройство 3 уровня, рассчитанное по математическим моделям в соответствии с классической теории телетрафика снижают в целом качество обслуживания, при этом основные критерии качества обслуживания QoS такие как: задержка передачи пакетов и потери пакетов будут иметь завышенные значения.

## Заключение

В настоящее время доминирует IP в качестве стандарта единого транспорта пакетного трафика, в которой не существует механизмов гарантированной передачи данных между двумя точками сети.

Актуальной становится задача обеспечения качества обслуживания QoS потому что, транспортная сеть работает с максимальными усилиями, потоки с различными приложениями (IP-телефония, IPTV и др.) тяготеют к этому общедоступному транспорту.

В ходе решения поставленных в диссертационной работе задач получены следующие результаты:

- проведено исследование реального IPTV трафика данных с целью определения степени самоподобия и фрактальной размерности с помощью метода агрегирования процесса;
- осуществлено имитационное моделирование поступления пакетов данных на маршрутизатор, подчиняющихся экспоненциальному распределению;
- осуществлено имитационное моделирование поступления пакетов данных на маршрутизатор, распределенного по закону Парето.

## Перечень сокращений

- ВОЛС – волоконно-оптические линии связи  
ИМ – имитационное моделирование  
МС – мультисервисная сеть  
МУЗ - медленно убывающая зависимость  
ОКУ – одноканальное устройство  
ОПТС – опорно-транзитные станции  
СМО – система массового обслуживания  
СПД – сеть передачи данных  
СТОП – сеть телекоммуникаций общего пользования  
ССШП – строго самоподобный в широком смысле процесс  
ТВ - телевидение  
ШПД – широкополосный доступ  
АТМ – асинхронный метод передачи  
AF (Assured Forwarding) - гарантированная доставка  
BE (Best Effort) – доставка по возможности  
BER (Bit Error Rate) – появление ошибочных битов  
CBWFQ (Class Based Weighted Fair Queuing) – обслуживание очередей на основе классов  
CoS (Class of Service) – класс обслуживания  
DNS (Domain Name Service) – система доменных имен  
DFA (Detrended Fluctuation Analysis) – метод выявления самоподобия  
ECN (Explicit Congestion Notification) - уведомляет о необходимости ограничения  
EF (Expedited Forwarding) – срочная доставка  
GPSS (General Purpose Simulation System) – моделирующая система общего назначения  
FIFO (First In First Out) «первый пришел – первый ушел».  
HDTV (High-Definition Television) – телевидение высокой четкости  
RED (Random Early Detection) - предупреждение перегрузок  
RIP – протокол маршрутной информации  
RSVP – протокол резервирования ресурсов  
NGN (Next Generation Network) – сети следующего поколения  
LRD (Long-range dependent) – долговременные зависимости  
LLQ (Low Latency Queuing) - очередность с низкой задержкой  
MPEG (Moving Picture Experts Group) – группа стандартов цифрового сжатия аудио и видео  
PQ (Priority Queuing) - очереди приоритетов  
OSI – эталонная семи уровневая модель  
IP (Internet Protocol) – межсетевой протокол  
ITU-T – Международный союз электросвязи  
IPTV - цифровое интерактивное телевидение нового поколения

VAoD (Video and Audio on Demand) – видео и аудио по запросу  
VoIP (Voice over IP) – голос поверх IP  
VPN – виртуальные частные сети  
QoS (Quality of Service) – качество обслуживания  
TCP (Transmission Control Protocol) – протокол управления передачей  
TCP/IP – стек протоколов TCP/IP  
TDM – временное разделение каналов  
ToS (Type of Service) – тип сервиса  
WAN – глобальная вычислительная сеть  
WFQ (Weighted Fair Queuing) - взвешенные справедливые очереди  
UDP - протокол пользовательских дейтограмм  
VAD (Voice Activity Detection) – детектор голосовой активности

## Список литературы

- 1 Гузиков Л. «Международная паутина» опутала Атырау // ZERDE. – Казахстан. – 2013. – № 7 – С. 27. <http://www.zerde.gov.kz>.
- 2 Бараш Л. Архитектура мультисервисных сетей // Компьютерное обозрение. – Киев. – 2002. – № 14. <http://www.vectorkiev.com/news>.
- 3 Шереметьев А. Мультисервисные сети // Компьютер пресс. 1999. – № 1 [webmaster@compress.ru](mailto:webmaster@compress.ru).
- 4 Сайт <http://www.nag.ru/goodies/articles/sst/sst.html>.
- 5 Сайт <http://connect007.narod.ru/index/0-70>.
- 6 Батыр С.С., Ступак Г.В. Методы прогнозирования трафика в компьютерных сетях. Наукові праці ДонНТУ. Випуск 130.
- 7 Корнышев Ю.Н. Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. // Теория телетрафика. Учебник для вузов. М. 1996 – 272с.
- 8 W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger and D .V. Wilson. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version), IEEE/ACM Transactions on Networking, 2, 1994, 1-15.
- 9 Бельков Д. В. Исследование сетевого трафика // Информатика, кібернетика та обчислювальна техніка ДонНТУ, – Донецк, 2009. – № 10.
- 10 Касиор А.В. Сравнительный анализ трафика проводных и беспроводных сетей ДонНТУ. <http://ea.donntu.edu>.
- 11 W. Willinger, M. S. Taqqu, and A. Erramilli. “A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks,” Stochastic Networks: Theory and Applications. In Royal Statistical Society Lecture Notes Series, Oxford University Press, 1996, vol. 4, pp.339–366.
- 12 Шелухин О. И., Тенякшев А. М. Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
- 13 Ильницкий С.В. Работа сетевого сервера при самоподобной (self-similar) нагрузке, <http://314159.ru>.
- 14 Крылов В.В. Самохвалов С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
- 15 Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Связь, 1979, – 224с.
- 16 Бестугин А.Р., Богданова А.Ф., Стогов Г.В. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей – СПб: Политехника, 2003. 174 с.: ил.
- 17 Сайт <http://kunegin.com/ref3/atm6/10.htm>.
- 18 Сайт <http://www.intuit.ru>.
- 19 Олифер Н.А., Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб: Питер, 2006. – 672с.
- 20 Федосеев Д. Управление пропускной способностью // LAN <http://www.osp.ru/lan/index.html>

- 21 Виноградский В.Е., Лихарев А.В. Построение сети IPTV: общие подходы. Технологии и средства связи. – 2007. – № 2.
- 22 Баскаков И.В., Пролетарский А.В., Мельников С.А., Федотов Р.А. IP-телефония в компьютерных сетях. Учебное пособие. УИТ М. 2008 – 183с.
- 23 Шереметьев А. Качество сервиса в мультисервисных сетях // Компьютер Пресс. 1999 № 6.
- 24 Статистические свойства Интернет трафика. – М.:ФОРУМ: ИНФА-М, 2006. – 108 с.
- 25 Афонцев Э. Cisco QoS для начинающих [http://network.xsp.ru/3\\_11.php](http://network.xsp.ru/3_11.php).
- 26 Федорова М.Л., Леденева Т.М. Об исследовании свойства самоподобия мультисервисной сети // Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии, 2010 № 1. С 46-54.
- 27 Жалейко Е.В. Методы моделирования самоподобного трафика. 7-ая Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2011).
- 28 Петров В.В. Статистический анализ трафика 2003. МЭИ <http://pi.314159.ru>
- 29 Шмелев И. В. Исследование и разработка метода оперативного управления мультисервисной сетью для потоков трафика с фрактальными свойствами. Автореферат диссертации. Москва. – 2004. – 20 с.
- 30 Данилов А.Н., Кайюмов С.Т. Анализ методов оценки параметров трафика мультисервисной сети доступа. Т-Comm Телекоммуникации и транспорт. - 2011. – №3. -С38-39.
- 31 Петров В. В. Самоподобие в сетевом трафике/ 58-я Научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова: Сборник трудов. Том 2. й М., 14-15 мая 2003. – 126 с.
- 32 Костромицкий А. И. Подходы к моделированию самоподобного трафика / А. И. Костромицкий, В. С. Волотка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010. – №46. - 46-49 с.
- 33 Власов А.И. Methods for predictive forecasting broadband networks. МГТУ. Сайт <http://swsys.ru>.
- 34 Треногин Н.Г. Соколов Д.Е. Фрактальные свойства сетевого трафика в клиент-серверной информационной системе // Вестник СУВПТ, С. 163-172.
- 35 Васильев К. К., Служивый М. Н. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170 с.
- 36 Кравченко В.Н. Характеристики простейшего потока событий. Сайт <http://modeling.at.ua/publ/6-1-0-17>
- 37 Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Иванова О.Г., Лагутин А.В., Тютюнник В.М. Фрактальный анализ и процессы в компьютерных сетях: учеб. пособие/. – 2-е изд., стереотип. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 108 с.
- 38 Любушин А.А. Фрактальный анализ временных рядов. Учебное пособие для старших курсов геофизического факультета. Москва. – 2006. – 23.
- 39 Вентцель Е.С. Теория вероятностей – М.: Наука, 1969. – 576 с.



40 Бельков Д. В. Методы определения фрактальной размерности рельефа обработанной поверхности – ДонНТУ. Сайт <http://ea.donntu.edu>.

41 Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с. – (Серия "Проектирование"). – ISBN 5-94074-219-X.

42 Исаев Р.И., Туманбаева К.Х., Мирзакулова Ш.А., Балгабекова Л.О. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права. Комплекс программ для ЭВМ под названием «Программы имитационного моделирования для исследования параметров трафика в сетевых устройствах». №1172. 12.08.2011.

43 Шевченко Д.Н., Кравчяня И.Н. Имитационное моделирование на GPSS: учеб.-метод. пособие для студентов технических специальностей/ - Беларусь: Изд-во Беларус. гос. ун-т. трансп. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 96 с.

44 Бронов С. А. Имитационное моделирование: учебно-метод. обеспечение самостоятельной работы студентов / С. А. Бронов; ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», – Красноярск: СФУ, 2007. – 137с.

45 Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World : учеб. пособие / В. Д. Боев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с. – ISBN 5-94157-515-7.

46 Шелухин О. И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. Учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2005. – 368с.

47 Кириченко Л.О., Радивилова Т.А., Стороженко А.В. Алгоритм предупреждения перегрузки компьютерной сети путем прогнозирования средней длины очереди. Сайт <http://masters.donntu.edu>.

48 Синев М.П., Пронькин Э.А. Определение самоподобного трафика. Сайт <http://niifivt.ru/publikacii/opredelenie-samopodobija-trafika>.

49 Пономарев Д.Ю. Исследование моделей телекоммуникационных систем с непуассоновскими входными потоками // Проблемы информатизации региона. ПИР-2001: Сборник научных трудов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2002. – С. 145-152.

**Приложение А** Листинг программы "Модель поступления простейшего потока на ОКУ"

```
GENERATE (Exponential(1,0,3.75))
TEST L Q1,100,Otkaz
QUEUE 1
SEIZE Pross
DEPART 1
ADVANCE 2
RELEASE Pross
TERMINATE 1
Otkaz TERMINATE 1
START 100
```

## Приложение Б Отчет одной из реализаций программы "Модель поступления простейшего потока на ОКУ"

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.1.1

Tuesday, February 12, 2013 05:39:39

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	396.521	9	1	0

NAME	VALUE
OTKAZ	9.000
PROSS	10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
	1	GENERATE	102	0	0
	2	TEST	102	0	0
	3	QUEUE	102	1	0
	4	SEIZE	101	1	0
	5	DEPART	100	0	0
	6	ADVANCE	100	0	0
	7	RELEASE	100	0	0
	8	TERMINATE	100	0	0
OTKAZ	9	TERMINATE	0	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
PROSS	101	0.504	1.980	1	101	0	0	0	1

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
1	5	2	102	44	0.364	1.414	2.486	0

CEC XN	PRI	M1	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
101	0	392.782	101	4	5		

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
103	0	403.567	103	0	1		

## Приложение В Листинг программы "Модель поступления самоподобного потока на ОКУ"

```
SYSTEM      STORAGE      24

Input       GENERATE      (Pareto(1,1/3.5,1.6))

            TEST L      Q$LINE,1500,loss
            Queue LINE
            Enter        SYSTEM
            Depart LINE
            Advance      (24#0.935)
            Leave        System
            TRANSFER ,EX

loss savevalue p_loss,N$loss
EX Terminate

GENERATE      10000000
  Terminate 1

start 1
reset

start 1
reset

start 1
reset

start 1
```

# Приложение Г Отчет одной из реализаций программы "Модель поступления самоподобного потока на ОКУ"

GPSS World Simulation Report

Tuesday, February 12, 2013 05:39:39

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	10000000.000	12	0	1

NAME	VALUE
EX	10.000
INPUT	1.000
LINE	10001.000
LOSS	9.000
P_LOSS	10002.000
SYSTEM	10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
INPUT	1	GENERATE	10206625	0	0
	2	TEST	10206625	0	0
	3	QUEUE	10204523	1108	0
	4	ENTER	10203415	0	0
	5	DEPART	10203415	0	0
	6	ADVANCE	10203415	24	0
	7	LEAVE	10203391	0	0
	8	TRANSFER	10203391	0	0
LOSS	9	SAVEVALUE	2102	0	0
EX	10	TERMINATE	10205493	0	0
	11	GENERATE	1	0	0
	12	TERMINATE	1	0	0

QUEUE LINE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
1500	1108	10204523	177158	291.922	286.072	291.126	0

STORAGE SYSTEM	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
24	0	0	24	10203415	1	22.896	0.954	0	1108	

SAVEVALUE P_LOSS	RETRY	VALUE
0	2101.000	

GPSS World Simulation Report - E\_\_МОИДОК~1\_МОИДОК~

Saturday, November 06, 2013 18:22:07

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
10000000.000	20000000.000	12	0	1

NAME	VALUE
EX	10.000
INPUT	1.000
LINE	10001.000
LOSS	9.000

P\_LOSS 10002.000  
 SYSTEM 10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
INPUT	1	GENERATE	10171666	0	0
	2	TEST	10171666	0	0
	3	QUEUE	10169387	331	0
	4	ENTER	10169056	0	0
	5	DEPART	10169056	0	0
	6	ADVANCE	10169080	24	0
	7	LEAVE	10169056	0	0
	8	TRANSFER	10169056	0	0
LOSS	9	SAVEVALUE	3387	0	0
EX	10	TERMINATE	10172443	0	0
	11	GENERATE	1	0	0
	12	TERMINATE	1	0	0

QUEUE LINE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
1500	331	10169387	167519	291.673	286.814	291.618	0

STORAGE SYSTEM	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
	24	0	0	24	10169080	1	22.819	0.951	0	331

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
P_LOSS	0	3386.000

GPSS World Simulation Report - E\_МОИДОК~1\_МОИДОК~1\_2010-2~1\_ДЛЯСОЕ~1\_switch\_H[1].74.3

Saturday, November 06, 2010 18:25:32

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
20000000.000	30000000.000	12	0	1

NAME	VALUE
EX	10.000
INPUT	1.000
LINE	10001.000
LOSS	9.000
P_LOSS	10002.000
SYSTEM	10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
INPUT	1	GENERATE	10150166	0	0
	2	TEST	10150166	0	0
	3	QUEUE	10149735	157	0
	4	ENTER	10149578	0	0
	5	DEPART	10149578	0	0
	6	ADVANCE	10149602	24	0
	7	LEAVE	10149578	0	0
	8	TRANSFER	10149578	0	0
LOSS	9	SAVEVALUE	762	0	0
EX	10	TERMINATE	10150340	0	0
	11	GENERATE	1	0	0
	12	TERMINATE	1	0	0

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY

LINE	1500	157	10149735	170809	283.423	279.242	284.022	0		
STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
SYSTEM	24	0	0	24	10149602	1	22.776	0.949	0	157
SAVEVALUE		RETRY		VALUE						
P_LOSS		0		761.000						

GPSS World Simulation Report - E\_\_МОИДОК~1\_МОИДОК~1\_2010-2~1\_ДЛЯСОЕ~1\_switch\_H[1].74.4

Saturday, November 06, 2010 18:29:09

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
30000000.000	40000000.000	12	0	1

NAME	VALUE
EX	10.000
INPUT	1.000
LINE	10001.000
LOSS	9.000
P_LOSS	10002.000
SYSTEM	10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
INPUT	1	GENERATE	10195899	0	0
	2	TEST	10195899	0	0
	3	QUEUE	10190402	186	0
	4	ENTER	10190216	0	0
	5	DEPART	10190216	0	0
	6	ADVANCE	10190240	24	0
	7	LEAVE	10190216	0	0
	8	TRANSFER	10190216	0	0
LOSS	9	SAVEVALUE	5654	0	0
EX	10	TERMINATE	10195870	0	0
	11	GENERATE	1	0	0
	12	TERMINATE	1	0	0

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY	
LINE	1500	186	10190402	178317	310.437	304.636	310.062	0

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
SYSTEM	24	0	0	24	10190240	1	22.867	0.953	0	186

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
P_LOSS	0	5653.000