

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

На правах рукописи

Самойлов

Самойлов Михаил Сергеевич

**АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ
ОБРАБОТКИ НЕПУАССОНОВСКОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО
ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Карташевский Вячеслав Григорьевич

Самара 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ	12
1.1 Общие принципы построения мультисервисных сетей.....	12
1.2 Архитектура мультисервисной сети	12
1.3 Требования современных приложений к параметрам МСС	14
1.3.1 Требования видеоприложений к параметрам МСС	15
1.4 Архитектура сети IPTV	16
1.4.1 Требования к транспортной сети	17
1.4.2 Функциональные блоки архитектуры IPTV.....	18
1.5 Оборудование и механизмы обеспечения передачи мультимедийного трафика по сетям IP.....	22
1.5.1 Оборудование и функции головной станции IPTV.....	22
1.5.2 Передача транспортного потока MPEG-2 по сетям IPTV. Инкапсуляция транспортного потока MPEG-2.....	24
1.5.3 Режимы передачи трафика в МСС.....	25
1.5.4 Принципы обеспечения качества обслуживания в сетях IPTV	27
1.5.5 Основные протоколы, применяемые при передаче видеотрафика по IP-сетям	28
1.5.6 Система связующего программного обеспечения.....	31
1.5.7 Услуги IPTV	33
1.6 Выводы по главе.....	34
2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ.....	36
2.1 Самоподобные процессы. Причины самоподобности в телетрафике	36
2.1.1 Определения и свойства самоподобных процессов	36

2.1.2 Долговременная и кратковременная зависимости	38
2.1.3 Медленно затухающая дисперсия и распределения с «тяжелыми хвостами»	39
2.1.4 Понятие коэффициента корреляции и автокорреляционная функция	40
2.1.5 Оценка параметра Херста	41
2.2 Исследование статистических характеристик интенсивности телекоммуникационного трафика МСС	42
2.2.1 Основные виды трафика МСС с классификационной привязкой к режимам передачи.....	42
2.2.2 Методика регистрации интенсивности мультимедийного трафика МСС	44
2.2.3 Анализ статистических характеристик интенсивности трафика МСС	46
2.3 Исследование статистических характеристик мультимедийного трафика при анализе узлов МСС как СМО	53
2.3.1 Методика регистрации мультимедийного трафика на узлах МСС	53
2.3.2 Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика узла доступа МСС	55
2.3.3 Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика абонентского оборудования доступа МСС	61
2.4 Выводы по главе.....	73
3 АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ	75
3.1 Методы теории вероятностей в исследовании законов распределения современного телекоммуникационного трафика МСС ..	75
3.1.1 Понятие статистического ряда и гистограмм	75

3.1.2	Применение критериев согласия при аппроксимации гистограмм.....	77
3.1.3	Функции программного обеспечения EasyFit.....	81
3.1.4	Аппроксимация функций распределения.....	81
3.2	Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для интенсивности мультимедийного трафика	82
3.3	Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для мультимедийного трафика узла доступа	84
3.4	Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для мультимедийного трафика абонентского оборудования доступа	89
3.5	Выводы по главе.....	97
4	РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ МЕТОДАМИ ТМО.....	99
4.1	Аналитические методы исследования телекоммуникационного трафика МСС	99
4.1.1	Аппроксимация функции плотности вероятностей суммой затухающих экспонент	100
4.2	Аппроксимация распределения плотности вероятности мультимедийного трафика узла МСС.....	101
4.3	Спектральное решение интегрального уравнения Линдли в общем виде.....	105
4.4	Спектральное решение интегрального уравнения Линдли для СМО типа $G/G/1$ при бимодальном распределении интервалов времени обслуживания	109
4.4.1	Спектральное решение интегрального уравнения Линдли для входного трафика СМО типа $G/G/1$ (ресивера IPTV).....	111
4.5	Методика анализа вероятностно-временных характеристик узла пакетной мультисервисной сети связи	123
4.6	Выводы по главе.....	125

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133

ВВЕДЕНИЕ

Исследование структуры и статистических параметров мультимедийного трафика, а также расчет характеристик телекоммуникационных узлов на различных уровнях инфокоммуникационных мультисервисных сетей является актуальной задачей современной науки.

Мультисервисные сети при текущей скорости развития информационной отрасли представляют собой сложнейшую систему и проблема передачи трафика в ней является довольно сложной. Преобладающую часть трафика пакетной мультисервисной сети занимает мультимедийный трафик, при этом существенная его часть представлена видеотрафиком IPTV. Преимущественно анализ трафика МСС сводится к исследованию статистических характеристик реализаций интенсивности трафика, однако более полную картину возможно получить, если рассматривать узлы МСС как системы массового обслуживания. Теория массового обслуживания оперирует статистическими характеристиками интервалов времени между заявками и интервалов времени обслуживания заявок. Применяя данные характеристики возможно провести аналитическое исследование узлов МСС.

Преобладание непуассоновского трафика приводит к невозможности анализа МСС при помощи методов теории массового обслуживания с моделями типа $M/M/1$ и $M/M/n$, используемых для описания телефонных сетей связи. Из-за непуассоновского характера реального трафика моделью узла МСС может служить система $G/G/1$, так как на практике зачастую имеются произвольные законы распределения временных параметров трафика.

Из-за несовершенства алгоритмов, используемых программами-симуляторами, анализ и прогнозирование трафика в системе массового обслуживания методами моделирования порой приводит к неудовлетворительным результатам. Поэтому появляется необходимость более детальных исследований инфокоммуникационных сетей с помощью аналитических методов.

Последнее десятилетие большое внимание уделяется исследованиям трафика МСС, имеющего признаки самоподобия. Во многих научных работах дано математическое описание самоподобных процессов, однако использование теоретических результатов на практике остается весьма сложной задачей, т.к. классическая ТМО предполагает независимость интервалов времени между заявками и интервалов обслуживания заявок, а самоподобность трафика обусловлена сильными корреляционными связями указанных интервалов.

Заметный вклад в решение задач исследования статистических свойств трафика и принципов анализа телекоммуникационных сетей внесли российские и зарубежные ученые С. Н. Степанов, О. И. Шелухин, В. И. Нейман, В. М. Вишневецкий, Г. П. Башарин, А. Е. Кучерявый, К. Е. Самуйлов, Г. Г. Яновский, А.Н. Назаров, L. Kleinrock, T. Saaty, M. S. Taqqu, I. Norros, K. Park, W. Willinger и др. ученые.

Сейчас анализ узлов МСС как систем массового обслуживания типа $G/G/1$ при передаче реального трафика остается малоисследованным вопросом. Поэтому аналитическое вычисление основных временных и вероятностных характеристик узла МСС при передаче непуассоновского трафика является актуальной задачей для решения в рамках научной работы.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является исследование статистических характеристик мультимедийного трафика и разработка методики анализа вероятностно-временных характеристик узлов обработки непуассоновского трафика для оценки эффективности функционирования мультисервисных инфокоммуникационных сетей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были **сформулированы и решены следующие основные задачи:**

– описание и исследование способов построения инфокоммуникационных МСС, описание архитектуры и основных функциональных блоков МСС (в т.ч. архитектуры сети IPTV);

- подготовка и проведение экспериментального исследования мультимедийного трафика на разных уровнях МСС; получение реализаций объединенного мультимедийного трафика, трафика Internet и видеотрафика IPTV;

- исследование статистических характеристик мультимедийного трафика разных уровней МСС на наличие и идентификацию признаков самоподобия; определение степени самоподобия различных видов трафика;

- аппроксимация гистограмм распределений временных параметров реального мультимедийного трафика;

- расчет вероятностно-временных характеристик мультимедийного трафика в системе массового обслуживания типа $G/G/1$ на основе решения ИУ Линдли;

- расчет временных характеристик мультимедийного трафика в СМО типа $G/D/1$.

Методы исследования. Все экспериментальные исследования проводились с применением специализированного ПО WireShark, EasyFit. При выполнении теоретических расчетов были применены методы математической статистики, теории вероятностей, теории массового обслуживания.

Научная новизна исследований, выполненных в диссертации, состоит в следующем:

- разработана методика определения степени самоподобия мультимедийного трафика на основе совокупной оценки параметра Херста, корреляционной функции и распределений временных параметров трафика;

- получено решение интегрального уравнения Линдли спектральным методом для систем массового обслуживания типа $G/G/1$ при обслуживании реального мультимедийного трафика с бимодальным распределением интервалов времени обслуживания пакетов;

- разработана методика расчета среднего времени ожидания пакетов мультимедийного трафика в системе массового обслуживания типа $G/D/1$,

основанная на использовании математического аппарата классической теории массового обслуживания;

– проведено исследование статистических характеристик трафика на разных уровнях инфокоммуникационной мультисервисной сети и получены вероятностно-временные характеристики узлов мультисервисных сетей как систем массового обслуживания при обработке непуассоновского трафика.

Практическая значимость диссертации. Разработанная методика определения степени самоподобия мультимедийного трафика по оценке параметра Херста, автокорреляционной функции и вероятностных характеристик временных параметров позволяет более точно произвести оценку трафика в условиях мультифрактальности. Полученные результаты исследований характеристик мультисервисных сетей могут быть востребованы при решении прикладных задач моделирования и проектирования телекоммуникационных сетей различного назначения.

В целях решения практических задач по анализу и контролю сетевого трафика разработана методика анализа вероятностно-временных характеристик узла пакетной мультисервисной сети связи.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается актами внедрения ее результатов в организациях, занимающихся разработкой и эксплуатацией МСС, и в учебный процесс ФГОБУ ВПО ПГУТИ.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Разработанная методика совокупного оценивания параметра Херста, корреляционной функции и вероятностных характеристик временных параметров трафика позволяет достоверно идентифицировать наличие самоподобных свойств анализируемого трафика.

2. Исследование вероятностных свойств мультимедийного трафика, в частности видеотрафика IPTV, показывает целесообразность использования бимодальных моделей для плотности вероятностей интервалов времени обслуживания пакетов.

3. Бимодальный характер плотности вероятностей времени обслуживания мультимедийного трафика приводит к заметному увеличению времени ожидания пакетов в очереди в системе $G/G/1$.

4. Методами классической ТМО показано, что при обработке мультимедийного трафика с бимодальным распределением времени обслуживания пакетов системой $G/G/1$, время ожидания пакета в очереди меньше, чем в системе $G/D/1$ с фиксированным временем обработки пакета.

Личный вклад автора. Все основные научные результаты исследований и выводы, изложенные в диссертации, получены автором лично и соответствуют пунктам паспорта 4, 12, 14 специальности 05.12.13.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Обоснованность и достоверность результатов обеспечены адекватным решаемой задаче выбором математического аппарата, корректностью применения вспомогательного программного обеспечения. Достоверность результатов подтверждается многочисленными экспериментами, выполненными на реальном оборудовании. Полученные аналитические результаты соответствуют представлениям классической теории и не противоречат результатам работ других авторов.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в организациях, занимающихся разработкой и эксплуатацией МСС и в учебный процесс кафедры «Мультисервисных сетей и информационной безопасности» ФГОБУ ВПО ПГУТИ, что подтверждено актами внедрения.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на 14-й и 16-й Международной Конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2012, 2014 гг.), на 68-й и 69-й Международной Конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (г. Москва, 2013, 2014 гг.), XII, XIV, XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (г. Казань, 2011, 2014 гг. Самара, 2013 г), на 24-й

Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) (г. Севастополь, 2014 г.), на Первой Международной научно-практической конференции «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии» (PICS&T-2013) (г. Харьков, 2013), на XIX, XX, XXI Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (ФГОБУ ВПО ПГУТИ, г. Самара, 2012 - 2014 гг.), 1-ом всероссийском конгрессе «Приоритетные технологии: актуальные вопросы теории и практики» (г. Волгоград, 2014 г.).

Публикации результатов. По результатам исследования опубликовано 17 печатных работ, 3 из них в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 6 публикаций международных научных конференций, 8 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. Работа содержит 147 страниц машинописного текста, 73 рисунка, 4 таблицы. В списке литературы 132 наименования.

1 АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

1.1 Общие принципы построения мультисервисных сетей

С развитием современных технологий передачи данных появилось понятие МСС, позволяющее оператору связи объединить предоставление всех типов услуг: данных, голоса, телевидения через единую телекоммуникационную среду передачи [46, 63, 79].

Отличительными признаками трафикового обмена в мультисервисных сетях связи является неоднородность передаваемого трафика, поскольку каждая услуга или приложение создает в сети трафик специфического типа, при этом появляется необходимость в обеспечении взаимной изоляции разнородного трафика, передаваемого по единой сети. Особое внимание при проектировании и строительстве МСС нужно уделить мероприятиям по обеспечению надежности функционирования и резервированию составных элементов. [83].

1.2 Архитектура мультисервисной сети

Концепция современной МСС предполагает организацию телекоммуникационной системы с предоставлением требуемого качества обслуживания соответствующих типу сервисов и приложений, передаваемых каждому пользователю [125].

В основе решения построения МСС Metro Ethernet лежит иерархическая модель с делением на функциональные уровни. В соответствии с этой моделью, сеть разделена на три больших уровня как показано на рис. 1.1:

- уровень ядра;
- уровень агрегации (распределения);
- уровень доступа;

на каждом из которых выполняются определенные сетевые функции.

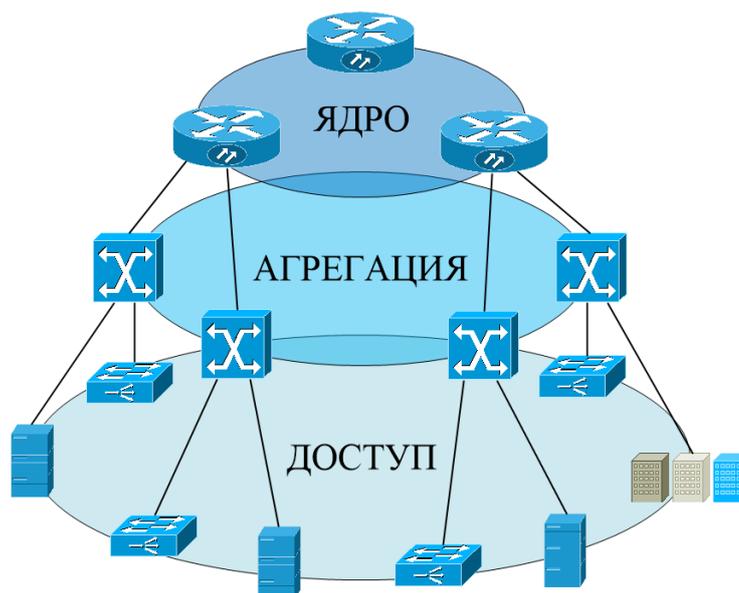


Рис 1.1. Архитектура мультисервисной сети Metro Ethernet

Каждый уровень сети обеспечивает оптимальные технические функции и выполняет задачи, соответствующие перечню услуг, предоставляемых МСС [125].

1. Необходимые требования, предъявляемые к уровню ядра:

- высокоскоростная коммутация и маршрутизация трафиковых потоков;
- оптимизация маршрутов и агрегирование трафиковых потоков;
- транзитная беспрепятственная передача внешнего трафика;
- маршрутизация многоадресных потоков, с поддержкой QoS;
- обеспечение гарантированного резервирования функций управления трафиком и электропитания оборудования и т.д.

Ядро сети топологически представляет собой кольцо или объединенные полукольца, к которым подключаются центральные узлы с функциями BRAS, взаимодействующие с системами прикладного программного обеспечения, серверами сети и внешней инфокоммуникационной сетью.

2. Необходимые требования, предъявляемые к уровню агрегации:

- агрегация потоков трафика, поступающих с уровня доступа;
- маршрутизация и агрегирование маршрутов трафика;
- маршрутизация многоадресных потоков, с поддержкой QoS;

– соблюдение приоритетов обслуживания, политик QoS и др. [77].

Уровень агрегации обеспечивает маршрутизацию, мониторинг и управление трафиком с разделением потоков по типам услуг и запросам пользователей, а также поддержку многоуровневого, многофункционального качества обслуживания.

Также в функции уровня агрегации входит подключение к сети оператора различных сервисных служб, оборудования маршрутизации, контент-серверов и оборудования IPTV.

3. Необходимые требования, предъявляемые к уровню доступа:

– реализация виртуальных локальных сетей (VLAN) на абонентском уровне доступа;

– выполнение сетевых правил и протоколов, приоритетов обслуживания, требуемого качества обслуживания и др.

Принципиально важным в концепции современной МСС является реализация механизма VLAN для всех абонентов на уровне абонентского доступа в сеть, позволяющего четко разграничить права и условия каждого пользователя в сети, не мешая их совместной работе, файловому обмену [125].

1.3 Требования современных приложений к параметрам МСС

Различные приложения и услуги, передаваемые по пакетным сетям, предъявляют ряд специальных требований к характеристикам СПД [83].

Оптимальная архитектура МСС должна обеспечивать эффективное выполнение требований, существенных для передаваемого в ней трафика. Архитектурное и системное решение сети MEN позволяет поддерживать широкий спектр услуг и приложений, предоставляемых абонентам сети. Весь транспортируемый трафик можно разделить в зависимости от требований к обслуживанию, полосе пропускания и чувствительности к задержкам, данная классификация представлена в таблице 1.1.

Таблице 1.1. Классификация услуг мультисервисной сети

1-я группа сервисов, критичная к задержкам и требующая гарантированную ПП	2-я группа сервисов, не сильно критичная к задержкам, но требующая ПП больше 1-ая группа	3-я группа сервисов, не критичная к задержкам и ПП
1) Услуги IP-телефонии; 2) Потокное видеовещание (IPTV), видео по запросу (Video on Demand); 3) Видеоконференции; 4) Потокное аудио (радиовещательные станции, online-прослушивание музыки).	1) Сетевые компьютерные игры, в том числе поддерживающие многоадресную рассылку; 2) Корпоративные VPN, а также VPN для пользователей; 3) Услуги, предоставляемые сторонним провайдерам контента (Content Provider).	1) Услуга доступа в Internet; 2) Хостинг (форумы, чат, сайты, web-порталы, online-магазины, домашние страницы пользователей); 3) Файловый сервер; 4) Электронная почта

1.3.1 Требования видеоприложений к параметрам МСС

Характерными требованиями видеоприложений к возможностям и техническим параметрам мультисервисной инфокоммуникационной сети в первую очередь следует считать:

- обеспечение высокой пропускной способности;
- обеспечение режима многоадресной передачи и вещания;
- синхронизация со звуковым потоком;
- стабильность канала управления и передачи служебной информации.

В зависимости от использованных методов кодирования видеопотока и требований передаваемого трафика, значение пропускной способности, необходимое для передачи видеотрафика, может меняться от десятков килобит до десятков мегабит в секунду. Наиболее высокие требования к пропускной способности предъявляются в системах передачи телевизионных и видеопрограмм.

На данный момент сектору МСС, обслуживающему 1000 человек в часы наибольшей нагрузки, требуется до 13 Гбит/с, из которых 1,4 Гбит/с будет занято ШПД, 11,5 Гбит/с – IPTV, и 6,3 Мбит/с – IP-телефонией. Исходя из этого

сделаем вывод, что на такой объем трафика сейчас необходима скорость на портах оборудования должна быть не менее 1 Гбит/с [12].

1.4 Архитектура сети IPTV

В основе архитектурной организации сети IPTV как составной части классической мультисервисной сети лежит базовый принцип передачи трафика по протоколу IP. В дополнение для построения сети IPTV необходим ряд специальных устройств для приема, обработки и передачи видео, а также специальное абонентское оборудование [53].

Существует несколько, принципиально не отличающихся, транспортных архитектур передачи видеотрафика IPTV, где в состав каждого решения входят основные уровни инфокоммуникационной МСС. Один из вариантов базовой архитектурной модели IPTV представлен на рис. 1.2 [47].

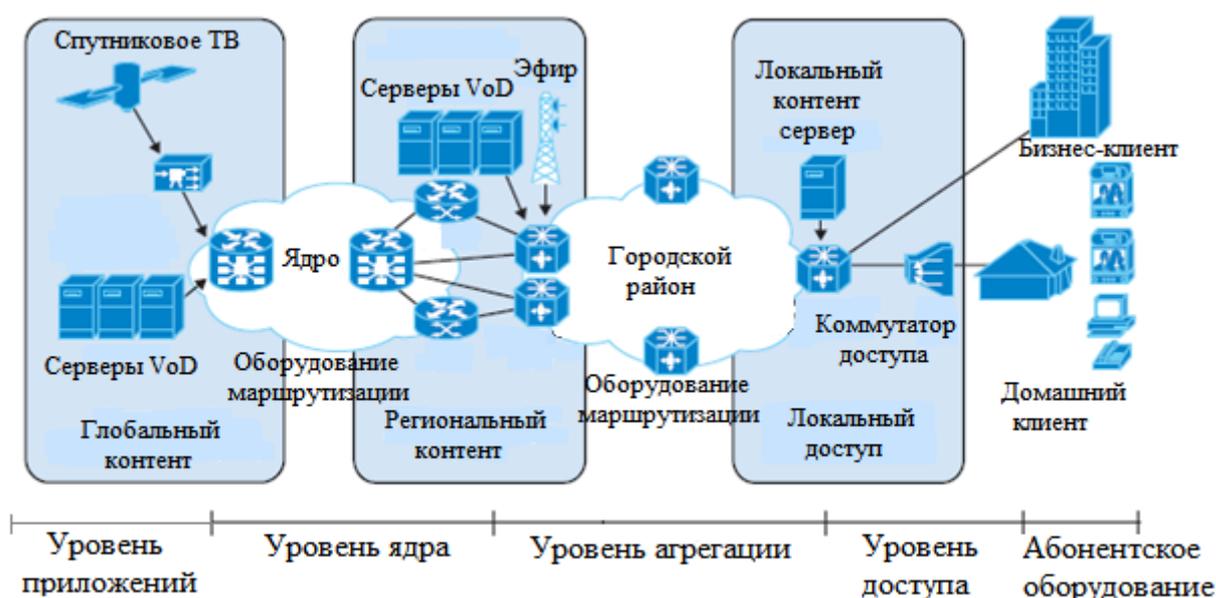


Рис. 1.2. Базовая архитектура мультисервисной сети IPTV

Описывая технологические особенности IPTV, зачастую, передачу видеотрафика по протоколу IP с гарантированным QoS, собственно IPTV, путают с интернет телевидением [68, 71].

Интернет-телевидение – это модель предоставления видеоконтента, принципиально отличающаяся от предоставления традиционных телевизионных услуг, как для потребителя, так и для провайдера услуг. Internet-TV является свободной растущей сетью, в которой множество крупных и мелких издателей, предлагающих зрителю расширенный список вещательных и собственных каналов, а также контент не связанный со стандартным вещанием.

IPTV – это мультисервисная платформа, которая создается и контролируется провайдером инфокоммуникационных услуг. Термины IPTV, DVB-IP, TVoIP применяются для обозначения передачи видеотрафика по операторским сетям, отличающимся от классических сетей КТВ способом инкапсуляции пакетов, методом передачи трафика по каналам электросвязи и набором протоколов, обеспечивающих функционирование и управление сетью.

1.4.1 Требования к транспортной сети

Принцип построения современных телекоммуникационных сетей базируется на иерархическом уровненом подходе [27, 76], где наибольшая нагрузка по передаче трафика ложится на транспортный уровень, где для обеспечения непрерывной и качественной передачи видеотрафика IPTV по СПД предъявляются особые требования к транспортной сети.

Основные функциональные требования к возможностям транспортной сети, необходимые для поддержки услуг IPTV [101].

1. Управление доступом.
2. Поддержка многоадресной и одноадресной передачи.
3. Обеспечение безопасности передаваемого трафика от несанкционированного доступа третьих лиц.
4. Хранение и использование пользовательских данных.
5. Обеспечение сбора соответствующих данных учета и тарификации.
6. Обеспечение возможности и механизма прохождения NAT.

7. Обеспечение требований для доставки и декодирования пакетов транспортных потоков IPTV, джиттер пакетов и переупорядочивание пакетов.

Джиттер пакетов, J – это изменение задержки при передаче пакета от источника потока до абонентского оборудования, при этом величина отклонения сетевой задержки d находится в интервале значений $-J/2 \leq d \leq +J/2$ в соответствии с ISO/IEC [118].

1.4.2 Функциональные блоки архитектуры сети IPTV

В классическом случае сеть IPTV проектируется и строится на базе распределенных информационных ресурсов. На рис. 1.3 показана архитектура сети IPTV в составе транспортной сети [42, 60], где нижний блок объединяет в себе всю транспортную часть инфокоммуникационной сети, а остальные уровни представляют собой подсистемы обработки, хранения, управления и защиты контента.

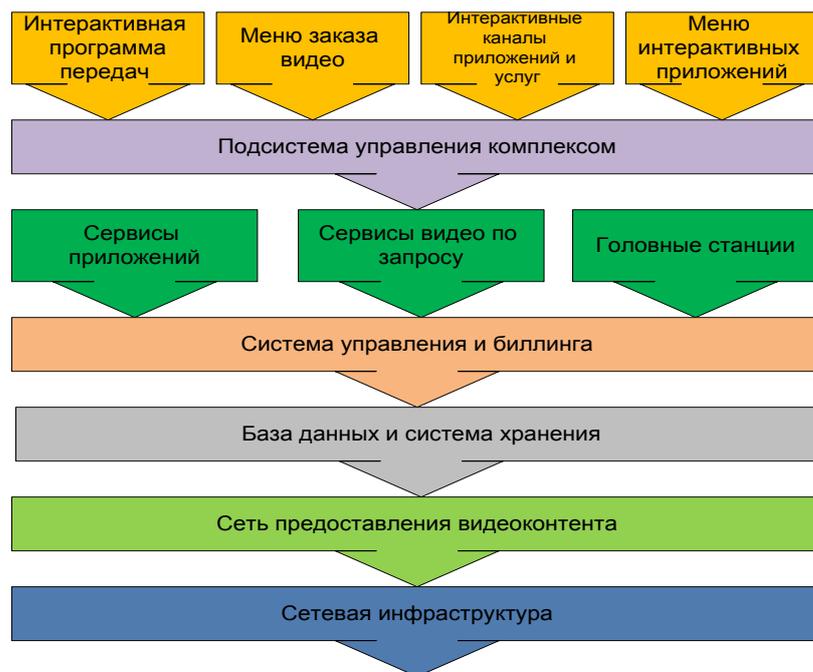


Рис. 1.3. Архитектура IPTV в составе транспортной сети

Модель сети IPTV включает следующие базовые компоненты [100]:

– телевизионные компании, являющиеся провайдерами контента;

- интеллектуальная платформа предоставления сервисов (подсистемы условного доступа, тарификации и связующего программного обеспечения);
- оборудование, обеспечивающее предоставления услуг и контента (головная станция и узлы кодирования / декодирования, комплексы серверов, обеспечивающих доступ к услугам видео по запросу);
- оборудование, обеспечивающее транспортировку контента (многоуровневая транспортная сеть на базе IP-протокола);
- абонентская платформа (абонентское оборудование и ПО).

Расширенная структура схема сети IPTV, изображенная на рис. 1.4, представляет наращиваемую МСС, в которой объединены все основные подсистемы, обеспечивающие передачу мультимедийного трафика.

1. Центральная головная станция открывает доступ к глобальному телевизионному контенту и серверам видео по запросу. Также на центральной станции осуществляется управление, мониторинг, тарификация и защита контента. Местная головная станция осуществляет вставки программ местного телевидения, предоставляет доступ к местным серверам видео по запросу, а также прямое кодирование и инкапсуляцию программ прямого эфира.

2. Транспортная сеть IPTV представлена в виде многоуровневой широкополосной волоконно-оптической МСС. Рис. 1.4 отражает ситуацию построения связанной региональной и магистральной ВОЛП МСС. В качестве магистрального ядра может использоваться любая операторская сеть связи федерального масштаба. Региональная транспортная сеть функционирует по иерархическому принципу стандартной МСС.

3. Функции управления сетью и мультимедийным трафиком (видеотрафиком IPTV), как правило, разделены границей регионов. Провайдером глобальной МСС контролируется: центральная головная станция, частично или полностью магистральная линия передачи трафика, центр приема, формирования, распространения и управления контентом. Местная транспортная сеть и местная головная станция контролируются региональным центром управления и мониторинга.

4. Основные функции головных станций и связующего программного обеспечения Middleware описаны в пунктах 1.5.1 и 1.5.6 соответственно.

5. Видеосерверы представляют собой дисковые массивы большого объема со специальным программным обеспечением, реализующим услуги VoD, NVoD, PRV [38].

6. Абонентское оборудование осуществляет обмен командами с головной станцией и принимает видео- и другой контент. Оборудование пользователя чаще всего реализовано в виде STB (ресивер IPTV), реже ПК.

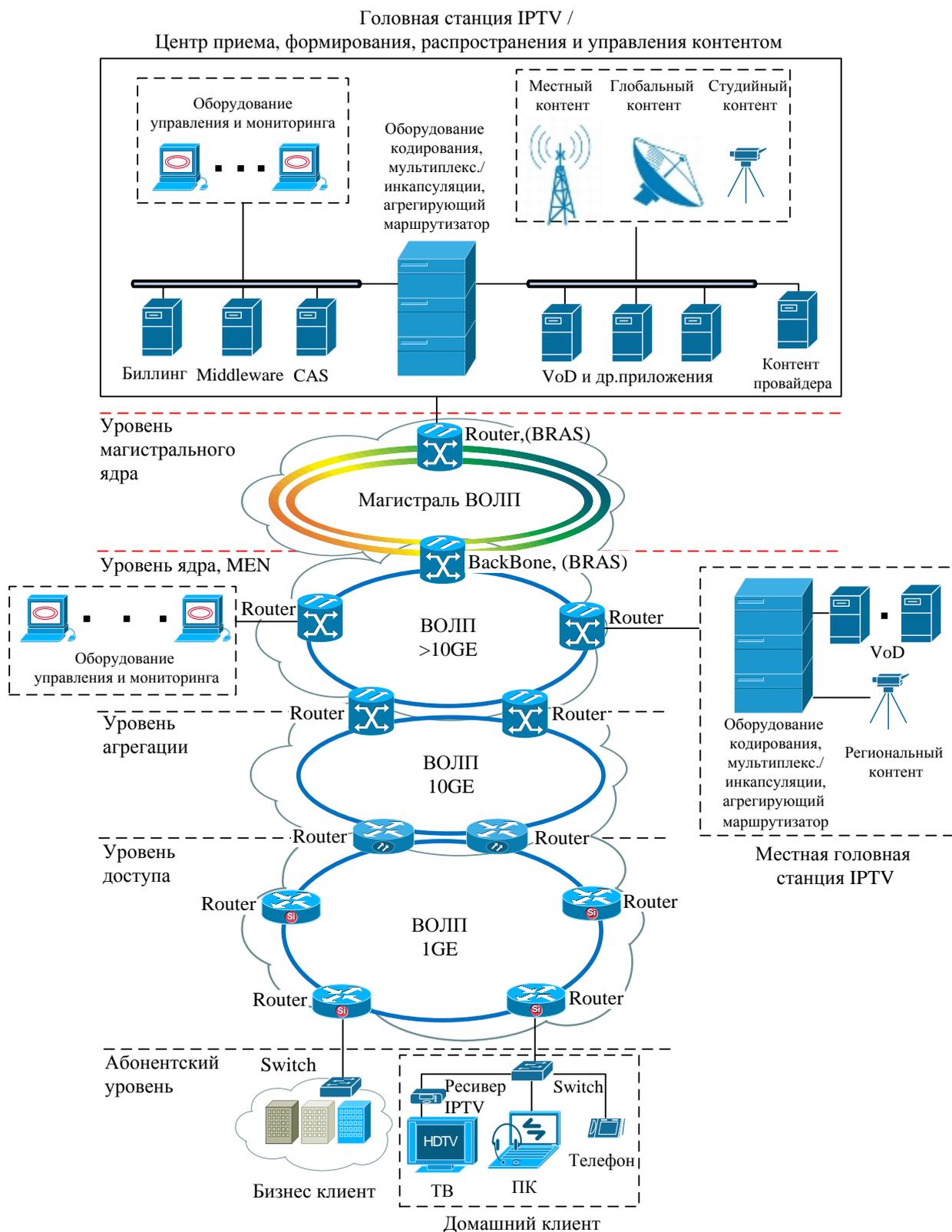


Рис. 1.4. Расширенная архитектура МСС для передачи видеотрафика IPTV

Для передачи мультимедийного трафика по сети IP все интерфейсы должны соответствовать требованиям IETF [104, 115].

1.5 Оборудование и механизмы обеспечения передачи мультимедийного трафика по сетям IP

1.5.1 Оборудование и функции головной станции IPTV

Головная станция IPTV представляет собой комплекс оборудования для приема трафика от различных источников (спутниковое вещание, студийный контент, эфирное вещание), преобразования полученного контента и его передачи в сеть оператора инфокоммуникационных услуг [21]. Рассмотрим некоторые основные требования к HeadEnd IPTV [40, 41].

Станция IPTV должна работать с широким спектром входных источников видеоконтента, в том числе:

- спутниковые телевизионные каналы в формате DVB-S/S2 однопрограммных или многопрограммных транспортных потоков [26, 32, 48];
- аналоговое и цифровое некомпьютеризованное видео от студийного телевизионного оборудования [26, 32, 48];
- эфирные цифровые программы в формате DVB-T/T2 [26, 32, 67];
- видеоконтент IPTV, передаваемый через пакетные транспортные сети.

Головная станция принимает и обрабатывает видеоконтент из вышеперечисленных источников, в результате получается множество однопрограммных транспортных потоков MPEG, инкапсулируемых в IP-пакеты и транслируемых в широковещательном режиме в IP-сети провайдера. Структурная схема построения головной станции IPTV и организации информационного обмена головной станции IPTV с «входящей» и «исходящей» сетью показана на рис. 1.5.

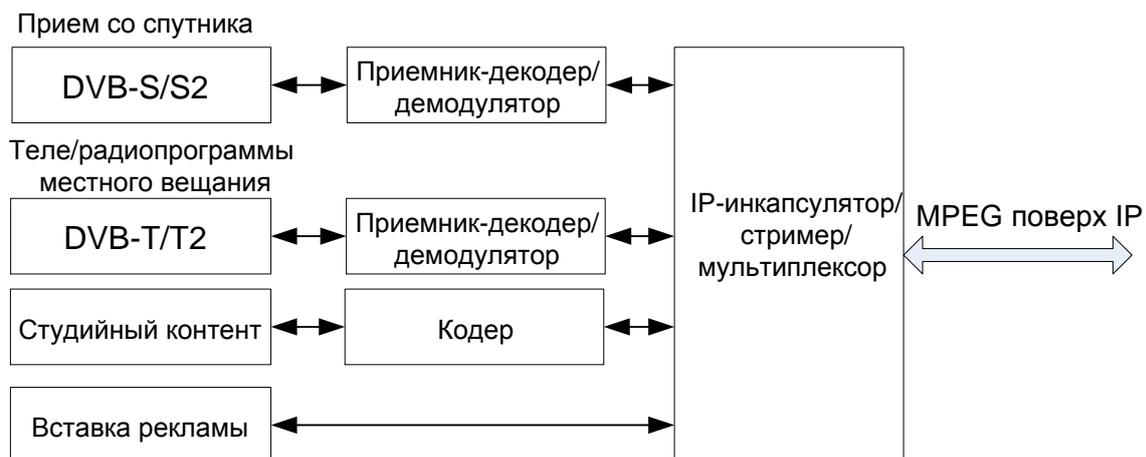


Рис. 1.5. Структурная схема построения головной станции IPTV

Основными компонентами обобщенной модели головной станции IPTV являются следующие составляющие [22].

1. Приемный комплекс – обеспечивает прием контента от станций эфирного вещания, искусственных спутников и местных источников контента.

2. Цифровые приемники, кодеры / декодеры, модуляторы / демодуляторы – обеспечивают раскодирование / демодуляцию цифровых сигналов, полученных от приемного комплекса и передачу контента стримеру / мультиплексу.

3. Узел кодирования сигналов в цифровой формат – обеспечивает кодирование по стандарту MPEG аналоговых и цифровых видеосигналов и передачу контента инкапсулятору / стримеру / мультиплексу.

4. Инкапсулятор / стример / мультиплексор – структурный элемент головной станции, обеспечивает мультиплексирование / инкапсуляция контента и передачу трафика по IP-сетям с обеспечением для каждого канала уникального адреса и IP-порта.

Более подробно компоненты головной станции рассмотрены в [11].

1.5.2 Передача транспортного потока MPEG-2 по сетям IPTV.

Инкапсуляция транспортного потока MPEG-2

При транспортировке по мультисервисным сетям IPTV транспортные потоки MPEG-2 [99] должны быть инкапсулированы в пакеты, соответствующие требованиям транспортной сети:

- RTP (транспортный протокол реального времени) [107, 112];
- UDP (протокол пользовательских дейтаграмм) [120].

Инкапсуляция MPEG-2 в транспортный протокол реального времени

Каждый IP-пакет в соответствии с [114] включает в себя стандартный заголовок IP, заголовок UDP, заголовок RTP и целое число n пакетов транспортного потока MPEG-2 по 188 байт. На рис. 1.6 показан формат пакета при инкапсуляции MPEG-2 в RTP.

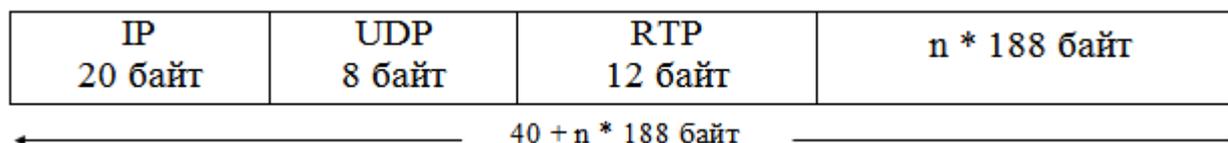


Рис. 1.6. Формат пакета при инкапсуляции MPEG-2 в RTP

Прямая инкапсуляция MPEG-2 в пакеты протокола пользовательских дейтаграмм

Современные сети IP могут обеспечить малые значения потерь и дрожания пакетов, а также отсутствие нарушений в порядке следования пакетов. Тогда транспортный поток может инкапсулироваться минуя RTP в пакеты протокола UDP в соответствии с Рекомендацией ITU-T [120]. На рис. 1.7 показан формат пакета при инкапсуляции MPEG-2 в UDP.

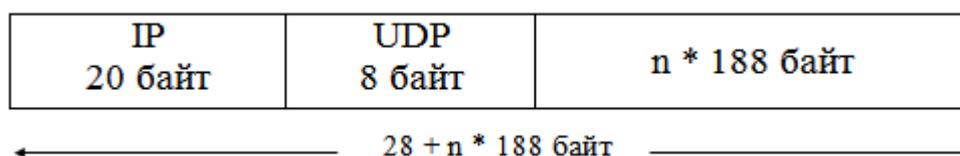


Рис. 1.7. Формат пакета при инкапсуляции MPEG-2 в UDP

1.5.3 Режимы передачи трафика в МСС

Передача трафика по транспортным каналам мультисервисных инфокоммуникационных сетей (IP-сетей) осуществляется в трех режимах: Unicast, Multicast, Broadcast [11, 54].

1. Режим unicast (одноадресная передача) используется для сервисов индивидуального характера. В режиме одноадресной передачи трафик направляется из одного источника к одному получателю пакетной сети передачи данных с единственным сетевым идентификатором, принадлежащим в этой сети только данному получателю [54] (компьютеру или абонентской приставке). Графическая интерпретация данного метода передачи приведена на рис. 1.8.

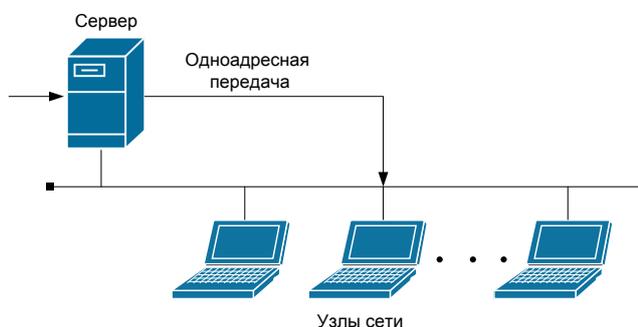


Рис. 1.8. Режим одноадресной передачи

В таком случае каждому пользователю доступен персональный видеоконтент в произвольное время, однако число абонентов, которые могут получать одноадресный трафик одновременно, ограничено пропускной способностью транспортной сети (скоростью потока).

2. Режим broadcast (широковещательная передача) использует выделенный IP-адрес для инициирования отправки единого потока данных всем абонентам мультисервисной инфокоммуникационной сети (IP-сети). Широковещательный трафик принимается независимо от инициативы абонента всеми терминальными устройствами (компьютерами и абонентскими приставками) зарегистрированными в сети. В связи с этим широковещательный режим передачи не используется для транспортировки широкополосного

видеотрафика, а применяется для передачи команд управления и прочей служебной информации [54, 117]. Пример передачи пакетов трафика в широковещательном режиме показан на рис. 1.9.

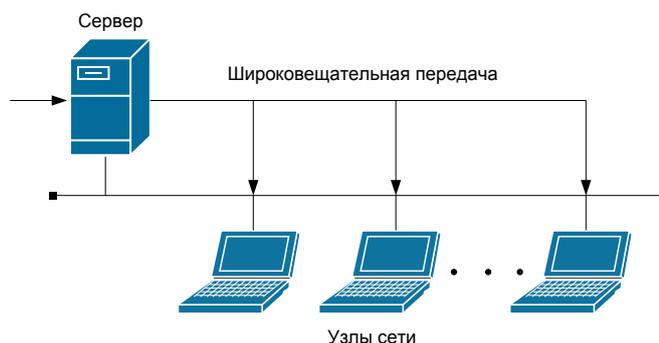


Рис. 1.9. Режим широковещательной передачи

3. Режим multicast (многоадресная передача) используется при потоковой передаче видеотрафика по мультисервисным инфокоммуникационным сетям. Многоадресный режим применяется при необходимости доставки информации без перегрузки сети всем «подписанным» абонентам. Многоадресный режим наиболее приемлем в сетях IPTV, где предпочтения абонентов в часы наибольшей трафиковой нагрузки, как правило, совпадают [54, 116]. Пример передачи трафика при многоадресном режиме распространения контента показан на рис. 1.10.

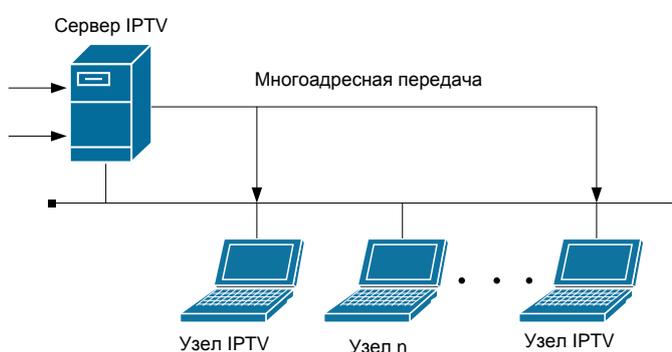


Рис. 1.10. Режим многоадресной передачи

Примечание: Коэффициент загрузки транспортной сети трафиком зависит от числа транслируемых каналов. Технология построения МСС IPTV подразумевает присутствие всех трех режимов передачи трафика.

1.5.4 Принципы обеспечения качества обслуживания в сетях IPTV

Существует несколько основных подходов к осуществлению политик предоставления необходимого качества услуг (QoS) для конечного пользователя.

1. IntServ – интегрированное обслуживание. Модель интегрированного обслуживания согласно [105], обеспечивает требуемое качество обслуживания с гарантированной пропускной способностью.

2. DiffServ – дифференцированное обслуживание. Модель дифференцированного обслуживания согласно [110, 111], обеспечивает управление классификацией пакетов трафика и управление транспортировкой трафика.

В МСС, используемых для транспортировки видеотрафика IPTV, пакеты необходимо маркировать кодовыми точками DSCP, детализированными в [100]. Точки DSCP для пакетов разного трафика имеют маркировку поля ToS в IP-заголовке, согласно стандартам приведенным в документе IETF [109].

Качество обслуживания (QoS) и качество восприятия (QoE)

Качество обслуживания (QoS) и качество восприятия (QoE) были определены как критические требования IPTV услуг для потребителей [124]. QoE описывает совокупное качество предоставляемых услуг и контента по мнению пользователя с учетом технических характеристик качества обслуживания QoS согласно рис. 1.11.

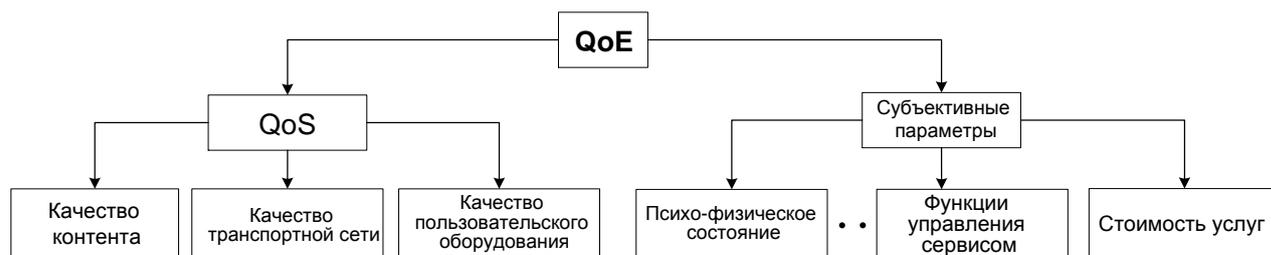


Рис. 1.11. Взаимосвязь параметров QoE и QoS.

Научно-исследовательские группы международного союза электросвязи ITU-T определяют качество восприятия QoE основным фактором, определяющим выбор абонента [37]. Данный фактор определяется не только параметрами сети или качеством предоставляемого контента, но и удобством использования системы. Качество восприятия мультимедийного контента часто проверяется путем тщательного выполнения субъективных тестов [24].

Рекомендация ITU-T [119] определяет основные значения параметров QoE и показывает значения технических сетевых параметров: *пропускная способность, скорость передачи и вероятность потерь пакетов*. За формирование QoE в мультисервисных инфокоммуникационных сетях IPTV отвечают следующие компоненты:

- суммарное число потерянных пакетов;
- типы аудиокодеков и видеокодеков;
- тип синхронизации аудиопотоков и видеопотоков;
- достаточная полоса пропускания для мультимедийного трафика.

Требуемое качество обработки пакетов видеотрафика формируется, по принципу недопустимости появления более одного артефакта в час.

1.5.5 Основные протоколы, применяемые при передаче видеотрафика по IP-сетям

Доступ отдельных абонентских устройств к мультимедийному трафику в мультисервисных сетях обеспечивается при помощи ряда протоколов. Ниже дадим краткую некоторым основным сетевым протоколам:

- протокол RTSP;
- протокол IGMP;
- протокол RTP.

Видеотрафик IPTV при многоадресной передаче IP транспортируется непрерывным потоком. Его передача не должна инициироваться каждым конечным абонентским устройством. Отдельные пользовательские узлы могут

взаимодействовать с серверами IPTV, формируя запросы о присоединении к службам многоадресной передачи трафика.

Провайдером услуг широкополосного доступа необходимо контролировать установление пользовательского канала, при инициировании абонентом доступа к услугам IPTV. Самыми вероятными причинами вмешательства оператора услуги в процесс передачи трафика являются: учет предоставляемых услуг (BSS), контроль исполнения алгоритмов условного доступа (CAS). В таких случаях необходимо использование протокола установления сеанса RTSP, функционирование которого осуществляется в соответствии с рекомендацией IETF [108].

Применение протокола RTSP

RTSP обеспечивает возможность контролируемой передачи видеотрафика по широкополосной мультисервисной сети. Протокол работает по клиент-серверной технологии при транспортировке трафика. При этом получатель может одновременно воспроизводить первый пакет данных, декодировать второй и получать третий [108].

Являясь протоколом уровня приложений, RTSP управляет передачей контента в реальном времени. Предусматривается использование протокола RTSP для двух случаев:

- потоковое вещания трафика IPTV;
- передача трафика видео по запросу.

Допускается использование протокола RTSP для получения ресивером IPTV потоков трафика в режиме многоадресной передачи.

Применение протокола IGMP

IGMP управляет передачей пакетов между пользователями по широкополосным IP-сетям в соответствии с [11, 100]. Также IGMP управляет взаимодействием между источниками многоадресных потоков и их получателями. Абонентское устройство, подключаемое к определенной многоадресной группе, формирует сообщение о подключении с адресом многоадресной группы, и передает его в транспортную сеть источнику

контента. Сформированный запрос приходит на ближайший коммутатора, получающий данный многоадресный поток (подписанный на данный трафик). Далее коммутатор ретранслирует данный многоадресный поток на порт, к которому подключено иницилирующее абонентское устройство.

В целях обеспечения наиболее качественного функционирования мультисервисных сетей в условиях постоянного роста трафика организацией IETF разработано три версии протокола IGMP [11, 69, 106].

IGMP v.1 передает требуемый многоадресный поток на все иницилирующие устройства. Прекращение передачи происходит только при отключении от группы последнего абонентского устройства. Использование первой версии протокола загружает сеть лишним трафиком и приводит к перегрузке конечного узла: постоянного переключения каналов в течение минуты достаточно, чтобы перегрузить коммутатор.

В IGMP v.2 помимо основных функций имеет возможность отправлять сообщение об отключении от группы многоадресной рассылки (leave group) отдельных абонентских устройств [11].

Основным отличием IGMP v.3 от IGMP v.2 является возможность абонентского устройства формировать перечень разрешенных и запрещенных серверов-источников трафика [113]. Помимо основных функций с помощью протокола IGMP источник многоадресного трафика формирует SAP сообщения, передаваемые в вещательном режиме и содержащие информацию о доступных многоадресных потоках [11].

Таким образом, протокол IGMP является основным протоколом управления видеотрафиком IPTV.

Применение протокола RTP

Протокол RTP определяет и компенсирует утраченные в процессе передачи пакеты, обеспечивает безопасность передачи контента и распознавание информации. Применение RTP играет заметную роль при работе на сетях с критичным количеством ошибок, где использование UDP не гарантирует соблюдение заявленного QoS. Протокол RTCP работает в связке с

RTP, тем самым обеспечивая соответствие отправленных и полученных пакетов, а также адрес и данные отправителя и контроль загрузки сети.

1.5.6 Система связующего программного обеспечения

Система Middleware – термин, включающий совокупность технологического ПО для взаимодействия между различными приложениями и компонентами системы IPTV. Также Middleware является важнейшей частью программно-аппаратного комплекса, т.к. осуществляет связь между головной станцией и абонентскими ресиверами, а также реализует графический интерфейс, с которым взаимодействуют абоненты [78].

Middleware поддерживает несколько типов клиентского программного обеспечения и оборудования: ПК, плеер IPTV, ресиверы IPTV.

1. Серверная часть Middleware построена на специализированной платформе и взаимодействует с программным обеспечением абонентских устройств, а также с элементами системы IPTV: CAS, системами прикладного программного обеспечения OSS/BSS, криптографическим протоколом SSL. Структурная схема взаимодействия подсистем IPTV посредством Middleware продемонстрирована на рис. 1.12.

2. Клиентская часть Middleware на сегодняшний день представлена тремя поколениями различных реализаций. Первым поколением считаются STB цифрового телевидения с пользовательским интерфейсом, основанном на WEB-технологиях. Второе поколение выполнено на базе низкоуровневого программного обеспечения, предназначенного для реализации графического пользовательского интерфейса на ресивере IPTV. Третье поколение – это приложения для нового типа абонентских устройств на базе открытых платформ и свободно распространяемого ПО.

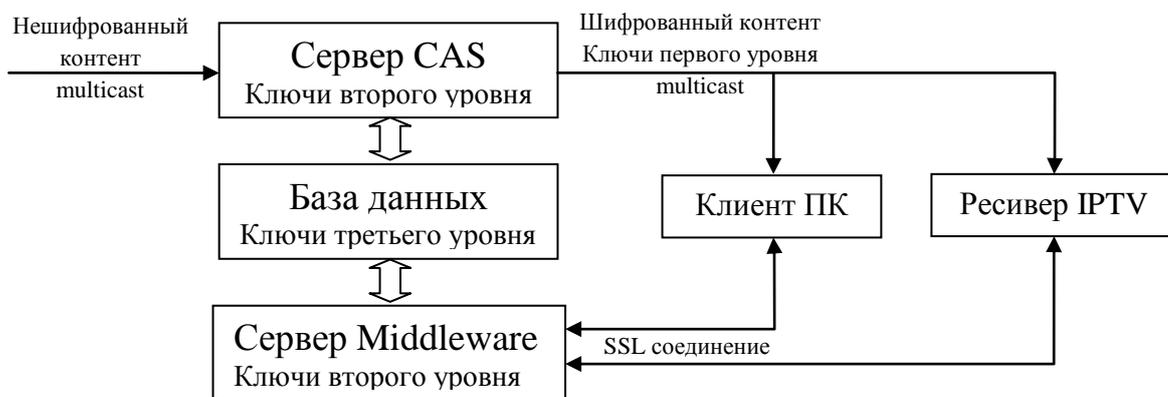


Рис. 1.12. Структурная схема взаимодействия подсистем IPTV посредством Middleware

Система Middleware обеспечивает интеграцию всех функциональных элементов в единый комплекс предоставления услуг, авторизацию подписчиков, формирует интерфейсы пользователя и администратора. Это позволяет абоненту пересмотреть статистику по предоставленным услугам, проверить баланс и др.

Основными преимуществами применения Middleware IPTV являются:

- использование средств формирования страниц сети интернет (обеспечивает быстрое, качественное и своевременное изменение интерфейса, с которым работает абонент);
- интерфейс стандартной конфигурации поддерживает несколько основных языков;
- возможность обработки команд, посылаемых другими пользовательскими устройствами и обеспечение работы с различными системами провайдера услуг.

Пользование функциональными возможностями системы связующего программного обеспечения открывает абоненту следующие возможности:

- авторизация в сети провайдера;
- формирование интерфейса управления IPTV;
- взаимодействие с различными системами предоставления услуг;
- взаимодействие с системой тарификации (OSS).

1.5.7 Услуги IPTV

Описывая полный спектр услуг, предоставляемых в рамках технологии IPTV, можно выделить три основных типа:

- базовые услуги;
- расширенные услуги;
- интерактивные телематические услуги.

Наряду с основной услугой IPTV: трансляцией потокового мультимедийного контента по IP-сети в многоадресном режиме существует целый ряд информационных приложений, услуг и служебной информации, передаваемой по СПД в обе стороны в одноадресном режиме. К таким услугам относятся [81]:

- видео по запросу – интерактивная услуга воспроизведения и записи фильмов, передаваемых в режиме одноадресной передачи;
- видео по запросу с расписанием – интерактивная услуга IP-телевидения, обеспечивающая возможность отложенного просмотра видеоконтента;
- ресурсы сети интернет, социальных сетей и других интерактивных сервисов базирующихся на использовании прямого и обратного IP-канала.

Также в рамках технологической концепции IPTV предоставляется ряд дополнительных приложений и услуг, описанных в [49, 74]. Помимо мультимедийных видов трафика, в сети IPTV циркулирует небольшое количество служебной информации: запросы на переключение каналов (групп многоадресной передачи), трафик управления вещательным контентом, контентом видео по запросу и другим трафиком.

1.6 Выводы по главе

На основе анализа доступных отечественных и зарубежных источников литературы в данной главе представлена характеристика современных инфокоммуникационных МСС. В частности, дана подробная характеристика мультисервисной сети, предоставляющей услуги IPTV.

Концепция современных МСС рассмотрена с точки зрения архитектурной организации, технологий, протоколов и программного обеспечения, необходимых для передачи мультимедийного контента с надлежащим качеством обслуживания. Перечислены основные требования, обеспечивающие передачу конкретного типа трафика с соответствующим QoS.

Описанные архитектурные особенности МСС опираются на различные источники информации, в частности электронные ресурсы профильных телекоммуникационных компаний и различные государственные и международные стандарты.

Архитектура сети IPTV как структура классической мультисервисной сети базируется на передаче трафика по широкополосной IP-сети, специальном оборудовании для приема, обработки и передачи видеотрафика и абонентском оборудовании. Отличительными особенностями сети IPTV являются набор специальных компонентов, которые определяют принципы ее функционирования.

1. Головная станция IPTV выполняет инкапсуляцию видеоконтента в IP-пакеты, адаптированные для передачи по МСС.

2. Абонентское оборудование обеспечивает прием и деинкапсуляцию пакетного трафика для последующего воспроизведения на экране.

3. Специальное программное обеспечение Middleware обеспечивает взаимодействие абонентского оборудования и головных станций.

4. Программно-аппаратные комплексы транспортной сети обеспечивают поддержку технологий передачи мультимедийного видеотрафика с надлежащим качеством сервиса.

В главе перечислены основные технические требования необходимые для адекватной транспортировки мультимедийной информации через широкополосную транспортную сеть. Охарактеризованы основные протоколы, применяемые для передачи пакетного мультимедийного трафика по инфокоммуникационной МСС. Также представлена информация о способах инкапсуляции транспортных потоков MPEG-2 в IP-пакеты, соответствующие требованиям транспортной сети. На базе сформулированных требований к современной инфокоммуникационной МСС определена оптимальная конфигурация МСС (сети IPTV), способная обеспечить эффективную передачу мультимедийного трафика (видеотрафика IPTV).

2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

2.1 Самоподобные процессы. Причины самоподобия телетрафика

Современные исследования показывают, что самоподобие в телекоммуникационном трафике может возникать в результате объединения множества изолированных источников [30, 51, 91, 123]. Такое объединение отдельных источников информации в результате приводит к появлению самоподобного трафика, стремящегося к фрактальному броуновскому движению [102, 128, 129]. ФБД – случайный процесс, который обладает некоторой памятью.

Понимание основных причин, приводящих к самоподобию в трафике инфокоммуникационных сетей, определяется тем, что не существует одного фактора, вызывающего его. Ниже представлены основные факторы, которые могут продуцировать самоподобие трафика мультисервисных сетей:

- поведение пользователя (канальный и интернет-серфинг, одновременная загрузка нескольких мультимедийных файлов);
- объединение трафика на различных сетевых уровнях;
- масштабирование и переконфигурация сети;
- автокорреляции, существующие в непуассоновском трафике в различных масштабах времени [127, 130, 132].

2.1.1 Определения и свойства самоподобных процессов

Самоподобие случайного процесса выражается в точном либо частичном повторении свойств данного процесса при рассмотрении его в различных временных масштабах.

Фрактальность – это свойство присущее самоподобным процессам. Фракталом называют математическую структуру, любая часть которой подобна целому [30].

Рассмотрим стационарный случайный процесс $X(t)$, $t \in Z$ с параметром Херста H , характеризующим степень самоподобия [51, 91]. Процесс $X(t)$ является строго самоподобным процессом в широком смысле с параметром Херста ($0,5 < H < 1$), если корреляционная функция гиперболически затухает:

$$R(k) = \frac{\sigma^2}{2} \cdot \left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right], \quad (2.1)$$

Известно, что коэффициент корреляции определяется соотношением $r(k) = R(k)/R(0) = R(k)/\sigma^2$, тогда нормированная теоретическая АКФ (коэффициент корреляции) самоподобного случайного процесса имеет следующий вид:

$$r(k) = \frac{1}{2} \cdot \left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right] \quad (2.2)$$

Агрегированный временной ряд

Возьмем стационарный процесс $X(t)$ с корреляционной функцией $R(k)$. Определим m -агрегированный временной ряд $X^{(m)}$, усредняя исходный ряд $X(t)$ по неперекрывающимся блокам размера m , заменяя каждый блок его средним значением [10, 23, 82]:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} X_i, \quad k \in Z. \quad (2.3)$$

В полученной агрегированной последовательности $X^{(m)}$ обозначим корреляционную функцию $R^{(m)}(k)$.

Случайный процесс $X(t)$ является асимптотически самоподобным процессом в широком смысле, с показателем H ($0,5 < H < 1$), если:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} R^m(k) = \frac{\sigma^2}{2} \cdot \left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right] \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) предполагает, что $R(k) = R^{(m)}(k)$ для всех $m > 1$, т.е. самоподобие сохраняется и при агрегировании исходной временной последовательности.

Дополнительно наличие самоподобия во временных последовательностях можно определить по следующим признакам.

1. Гиперболически затухающая автокорреляционная функция несуммируема и расходится, т.е. для нее справедливо выражение $\sum_k R(k) = \infty$.

2. Дисперсия самоподобного процесса убывает медленнее величины, обратной величине выборки:

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

2.1.2 Долговременная и кратковременная зависимости

Проанализируем определение долговременной зависимости и его взаимосвязи с коэффициентом корреляции $r(k)$.

Процесс $\{v_i, i \in Z\}$ называется долговременно зависимым стационарным процессом, когда существует постоянная $c_r > 0$ и действительное число $\alpha \in (0;1)$, $\alpha = 2 - 2H$, при которых:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{r(k)}{c_r k^{-\alpha}} = 1 \quad (2.5)$$

Процесс $\{Y_i, i \in Z\}$ называется кратковременно зависимым стационарным процессом, когда существует постоянная $0 < c_0 < 1$, при которой $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{r(k)}{c_0^k} = 1$.

Если разложить $r(k)$ в ряд Тейлора:

$$r(k) = H(2H - 1)k^{2H-2} + o(k^{2H-2}) \text{ при } k \rightarrow \infty, \quad (2.6)$$

то видно, что функция $r(k)$ в асимптоте является несуммируемой $\sum_{k=-\infty}^{\infty} r(k) = \infty$.

Тогда в случае гиперболического затухания $r(k)$ и из условия (2.5) видим, что $\{Y_i, i \in Z\}$ является долговременно зависимым.

Процесс $\{Y_i, i \in Z\}$ называется долговременно зависимым стационарным процессом, если существует постоянная $c_f > 0$ и действительное число $\beta \in (0; 1)$, при которых $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{S(\omega)}{c_f |\omega|^{-\beta}} = 1$. Поведение функции $S(\omega)$ в начале координат описывается выражением:

$$S(\omega) = c_f |\omega|^{1-2H} + O\left[|\omega|^{\min(3-2H, 2)}\right], \quad (2.7)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность процесса. Выражение (2.7) используется при оценке параметра Херста в частотной области.

2.1.3 Медленно затухающая дисперсия и распределения с «тяжелыми хвостами»

Для самоподобного процесса дисперсия выборочного среднего уменьшается медленнее, чем величина, обратную величине выборки:

$$\sigma^2[X_t^{(m)}] \approx m^{-\beta}, \quad 0 < \beta = 2H < 1,$$

для большого m . Свойство *медленно затухающей дисперсии* можно выявить при нанесении на log-log график функции $\sigma^2[X_t^{(m)}]$ от m . Прямая линия с отрицательным наклоном, меньшим чем 1, в широком диапазоне m указывает на медленно затухающую дисперсию. Это свойство может быть также определено при помощи индекса дисперсии IDC [91].

$$IDC = \frac{\sigma^2(X_t^{(m)})}{E(X_t^{(m)})} \quad (2.8)$$

ДВЗ тесно связана с РТХ. Если «хвост» функции $P[Z > x] \approx cx^{-\alpha}$, при $x \rightarrow \infty$, где α – параметр формы ($0 < \alpha < 2$), а c – положительная константа затухает по гиперболическому закону, то

переменная Z имеет *распределение с «тяжелым хвостом»*. Классическими РТХ принято считать распределения Парето, Вейбулла и логнормальное, которые имеют субэкспоненциально спадающие «хвосты», но обладают конечной дисперсией при определенном сочетании параметров. Особенность распределений с тяжелыми хвостами, в том, что они проявляют высокую степень изменчивости [95]. Таким образом, РТХ в трафике мультисервисных сетей объясняют причины ДВЗ и самоподобия пакетного трафика.

2.1.4 Понятие коэффициента корреляции и автокорреляционная функция

Статистическая зависимость порядка k между каждым i -м элементом ряда и $(i+k)$ -м элементом может быть охарактеризована автокорреляционной функцией [1, 4, 85, 92, 93]. Определение самоподобия также дается через коэффициент корреляции, который для временного ряда рассчитывается по формуле:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X}) \cdot (X_{i+k} - \bar{X})}{(N - k) \cdot \sigma^2}, \quad (2.9)$$

где N – общее число элементов последовательности;

\bar{X} – выборочное среднее последовательности X ;

σ^2 – выборочная дисперсия последовательности;

k – временной лаг (сдвиг, запаздывание).

Через коэффициент корреляции могут быть найдены периодические составляющие временного ряда.

Периодическая составляющая для любого лага k может быть удалена взятием разности соответствующего порядка, т.е. из каждого i -го элемента ряда вычитается $(i-k)$ -й элемент. Такое преобразование может оказаться полезным.

1. Появляется возможность определения периодических составляющих ряда и их исключения, которое сделает некоторые другие сезонные составляющие более заметными.

2. Удаление периодических составляющих делает ряд стационарным, что необходимо для применения некоторых методов анализа.

2.1.5 Оценка параметра Херста

Оценка параметра Херста зависит от нескольких факторов (например, методики оценки, размера выборки, масштаба времени, корреляционной структуры и т.д.). Существует несколько методов оценки параметра Херста во временных рядах, однако наиболее простым и информативным является анализ R/S -статистики.

Оценка показателя Херста во временной области через анализ R/S -статистики

Исследование изменчивости различных статистических явлений привело к разработке нормированной безразмерной величины, способной описать изменчивость. Эта величина названа *нормированным размахом* (R/S) [4, 13, 17, 91, 92].

Возьмем реализацию случайного процесса $Z(t)$. Разобьем все время наблюдения на ряд i ($i=0,1,2,\dots,N$) интервалов длительностью Δt . Тогда $Z=Z(i)$ есть временной ряд этого процесса. Среднее значение данного временного ряда Z вычисляется с помощью выражения:

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Z_i .$$

Затем определим величину Δ_k отклонения от среднего значения:

$$\Delta_k = \sum_{j=0}^k (Z_j - k \bar{Z}).$$

Далее определим величину R , которая носит название максимального размаха исследуемого ряда:

$$R = \max \Delta_j - \min \Delta_j,$$

и среднеквадратичное отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (Z_i - \bar{Z})^2}{N}}.$$

Доказано, что для случайных процессов справедливо следующее равенство $\frac{R}{S} = N^H$, где величина H (параметр Херста) может меняться от 0 до 1. По R/S -анализу показатель Херста, определяется как:

$$H = \frac{\lg\left(\frac{R}{S}\right)}{\lg(N)},$$

где R – максимальный размах исследуемого ряда;

S – СКО наблюдений;

N – количество наблюдений.

2.2 Исследование статистических характеристик интенсивности мультимедийного трафика МСС

2.2.1 Основные виды мультимедийного трафика МСС с классификационной привязкой к режимам передачи

Значительную часть информации, передаваемой по сети, занимает мультимедийный трафик, в том числе видеотрафик IPTV. В силу большой востребованности мультимедийного трафика, возникает проблема передачи контента по широкополосным МСС операторов. Здесь мы сталкиваемся с проблемой перегрузки сети, из-за неотлаженных механизмов обслуживания мультимедиа контента. В сложившейся ситуации, важную роль оказывает

изучение природы видеотрафика и влияния, оказываемое им на оборудование и телекоммуникационную сеть в целом [80].

Объединенный мультимедийный трафик МСС можно разделить на три основные компоненты по способу передачи (см. подпункт 1.5.3 Глава 1):

- многоадресная передача;
- одноадресная передача;
- широковещательная передача.

Многоадресный режим обеспечивает непосредственную передачу потокового видеотрафика в соответствии со стандартом [116].

Одноадресный режим используется для транспортировки целого ряда информационных приложений, услуг и служебной информации передаваемых по СПД каждому пользователю отдельно. Особое место среди них занимают мультимедийные услуги [11]:

- VoD – интерактивная услуга проигрывания и записи фильмов в режиме одноадресной передачи;
- nVoD – сервис цифрового телевидения «виртуальный кинозал» или «карусельное видео»;
- мультимедийные сервисы сети Internet и другие интерактивные ресурсы на базе открытых платформ с использованием прямого и обратного IP канала.

Более подробно качественный состав зарегистрированного трафика, передаваемого в одноадресном режиме описан в [61].

Увеличение пользовательской активности в ЧНН приводит к неэффективной загрузке транспортной сети и высокой нагрузке на узловое оборудование.

Широковещательный режим передачи трафика как правило используется для транспортировки минимального объема служебной информации в объединенном потоке (единицы процентов), в следствии чего отдельное статистическое исследование данного трафика нецелесообразно.

2.2.2 Методика регистрации интенсивности мультимедийного трафика МСС

В основе изучения статистических характеристик интенсивности мультимедийного трафика лежат результаты измерений, проводимые в реальных условиях работы МСС. Упрощенная структурная схема МСС представлена на рис. 2.1, на ней ТМ обозначен входной порт маршрутизатора уровня доступа. Анализируемая статистика представляет собой изменение интенсивности во времени, называемую трассой трафика (число пакетов, поступающих в единицу времени). Трафиковая трасса – является реализацией целочисленного случайного процесса, каждый отсчет которого есть некоторое число событий, зафиксированных в выбранный интервал времени [90].

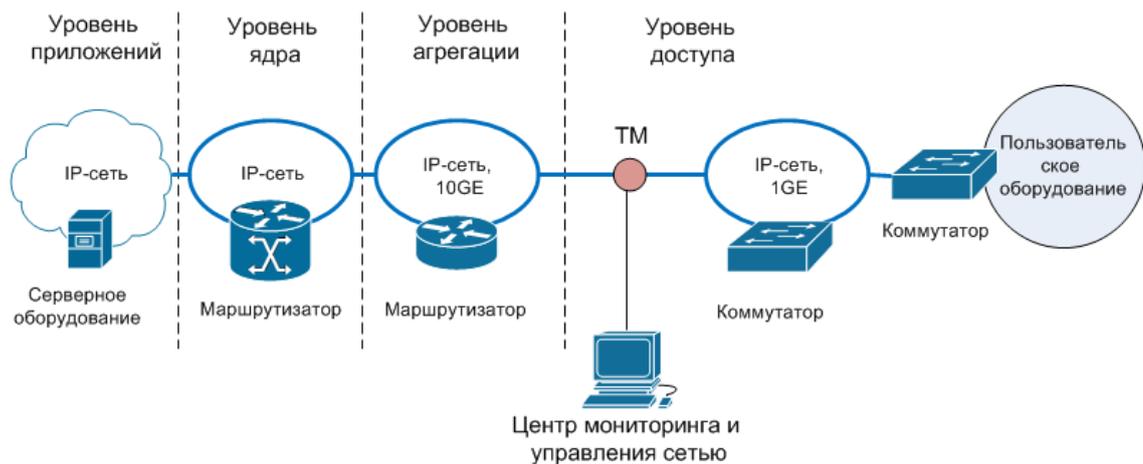


Рис. 2.1. Схема регистрации интенсивности трафика на уровне доступа

Экспериментальные данные представляют собой пакеты, зарегистрированные на входном порту маршрутизатора узла доступа с интервалом одна минута (время регистрации примерно 20 часов).

Для начала приведем графики временных зависимостей исходных интенсивностей трафика в одноадресном и многоадресном режимах передачи на рис. 2.2 и рис. 2.3 соответственно, где:

- X_i – интенсивность пакетов;
- i – время регистрации (в минутах).

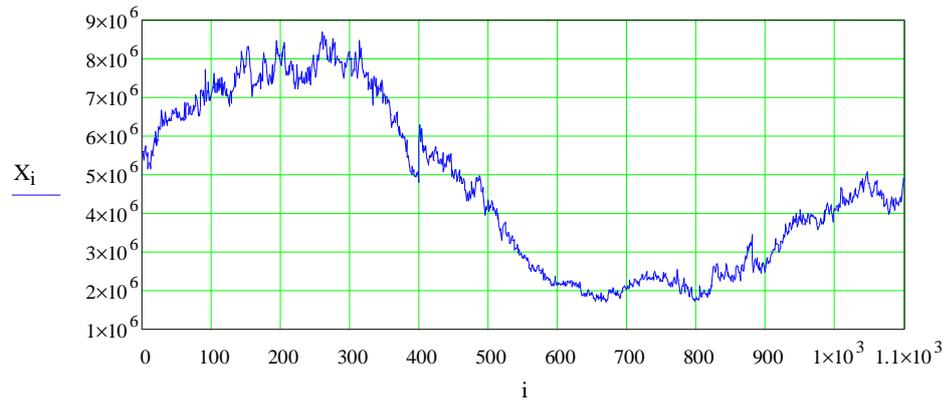


Рис. 2.2. Интенсивность *исходного* мультимедийного трафика одноадресной передачи

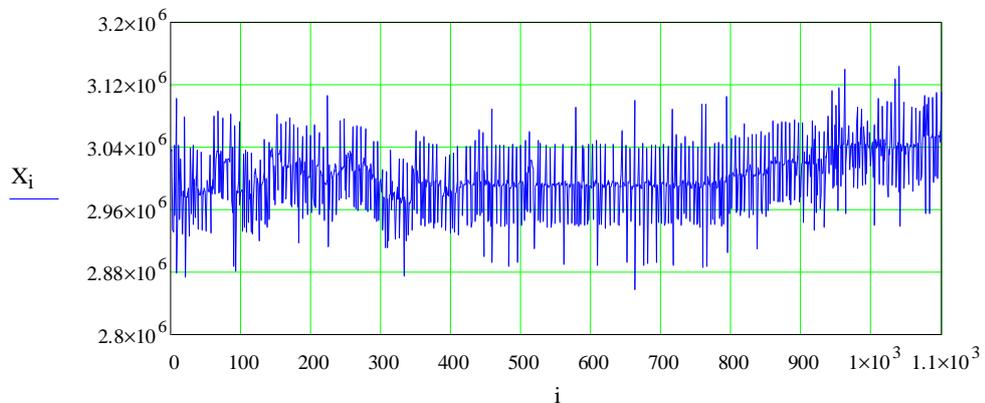


Рис. 2.3. Интенсивность *исходного* мультимедийного трафика многоадресной передачи (IPTV)

По графику временного распределения интенсивности одноадресной передачи можно сделать выводы о часах наибольшей нагрузки на МСС. Сбор трафика проходил с 07.00 до 03.00 утра следующих суток. Из рис. 2.3 видим, что наибольшая активность (интенсивность трафика) абонентов наблюдается с 10.00 до 12.00, 21.00 до 00.00, наименьшая активность наблюдается с 16.00 до 21.00.

Заметим, что по оси ординат интенсивность трафика одноадресной передачи имеет значительный разброс принимаемых значений ($1,8 \cdot 10^6 \div 8,8 \cdot 10^6$ пакетов), тогда как значения интенсивности трафика многоадресной передачи сосредоточены в интервале ($2,85 \cdot 10^6 \div 3,10 \cdot 10^6$ пакетов).

2.2.3 Анализ статистических характеристик интенсивности трафика МСС

Анализ статистических характеристик интенсивности трафика одноадресной передачи

Выше было сказано, что трафик большинства современных приложений является самоподобным, и обладает характерными законами распределения случайных значений интенсивности, а именно – РТХ.

В данной главе используем два способа для идентификации признаков самоподобия в исследуемых случайных процессах.

1. Вычисление коэффициентов корреляции, построение и анализ нормированной АКФ.

2. Вычисление параметра Херста.

Чтобы оценить статистические свойства трафика будем рассматривать исходную и агрегированную последовательности одной реализации трафика. Процедура агрегирования необходима для приведения исходных реализаций трафика к эквидистантной (с постоянным шагом Δt) шкале по оси времени [55, 91]. Определим m -агрегированный временной ряд X^m , применив выражение (2.3).

График агрегированного ряда интенсивности трафика в режиме одноадресной передачи приведен на рис. 2.4.

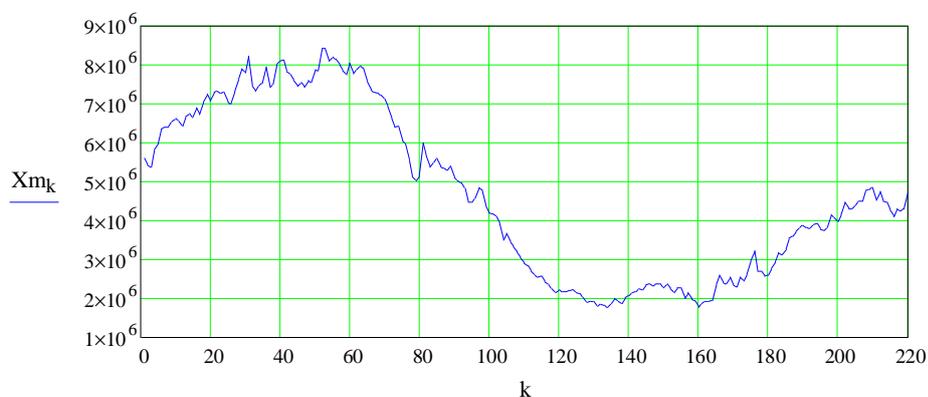


Рис. 2.4. Интенсивность *агрегированного* мультимедийного трафика одноадресной передачи

Заметно, что графики зарегистрированного исходного и агрегированного процессов, изображенные на рис. 2.2 и 2.4 соответственно, очень похожи, что является косвенным признаком существования статистической связи внутри ряда, а следовательно наличия самоподобия.

Для оценки самоподобия полученных трафиковых трасс вычислим коэффициенты корреляции и построим АКФ рядов $\{X_i$ и $X^{(m)}_i, i \in Z\}$. Считая, что ряды обладают свойством *эргодичности*, коэффициенты корреляции исходного трафика $r(k)$ можно вычислить из формулы (2.9). Коэффициенты корреляции агрегированного трафика $r^{(m)}(k)$ определяются по формуле:

$$r^{(m)}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X^{(m)}_i - \bar{X}^{(m)}) \cdot (X^{(m)}_{i+k} - \bar{X}^{(m)})}{(N-k) \cdot \sigma^{(m)2}}, \quad (2.10)$$

где N – общее число элементов *агрегированной* последовательности;

$\bar{X}^{(m)}$ – выборочное среднее *агрегированной* последовательности $X^{(m)}$;

$\sigma^{(m)2}$ – выборочная дисперсия *агрегированной* последовательности;

k – лаг (сдвиг, запаздывание).

Графики зависимостей коэффициентов корреляции исходного $r(k)$ и агрегированного $r^{(m)}(k)$ трафика от сдвига k приведены на рис. 2.5 и 2.6.

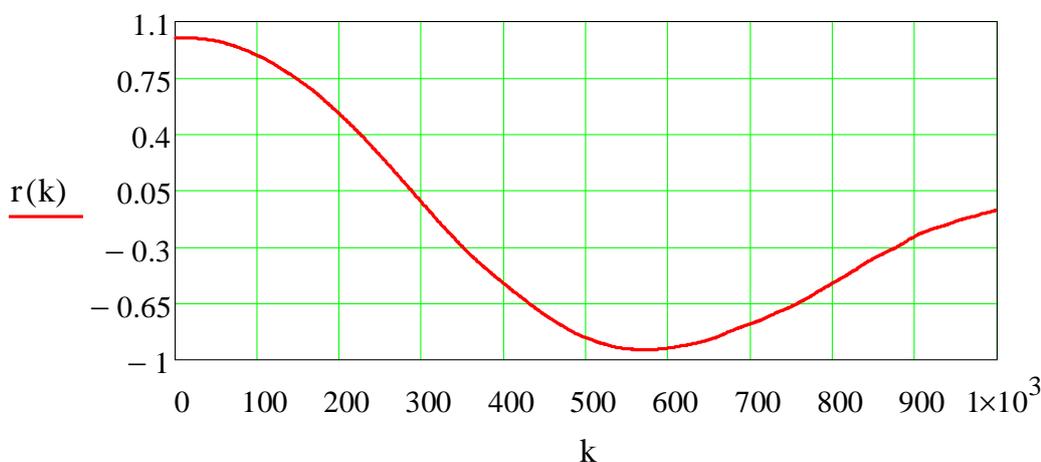


Рис. 2.5. Коэффициент корреляции *исходного* трафика, при одноадресном режиме передачи

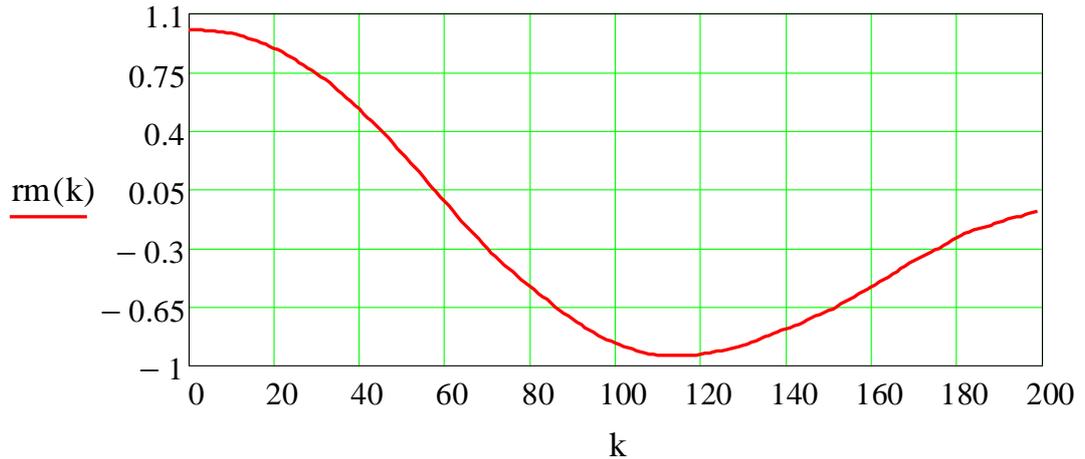


Рис. 2.6. Коэффициент корреляции *агрегированного* трафика, при одноадресном режиме передачи

Следующим шагом рассчитаем значение параметра Херста методом *R/S*-анализа. Один из возможных вариантов оценки параметра Херста методом *R/S*-анализа, использование ПО Fractan [94]. Некоторые варианты исследования трафика на самоподобие с помощью ПО Fractan продемонстрированы в работах [29, 34, 73], однако существуют некоторые недочеты использования данного ПО: ограниченный объем буфера (≈ 40000 пакетов) и весомая погрешность вычисления.

В данной диссертационной работе параметры Херста для интенсивностей исходного и агрегированного трафика одноадресной передачи определены при помощи алгоритма, приведенном в подпункте 2.1.5. Расчетные значения H :

- исходный ряд интенсивности одноадресной передачи – 0,882;
- агрегированный ряд интенсивности одноадресной передачи – 0,847.

По совокупности результатов проведенного анализа можно сказать, что интенсивность трафика одноадресной передачи обладает самоподобием.

Обращая внимание на трафиковые трассы интенсивностей, и принимая во внимание ЧНН отображенные на них в течении 20 часов, предположим, что периодичность данных процессов будет прослеживаться от суток к суткам. Тогда можно говорить о долговременной периодической зависимости исследуемого случайного процесса, что само по себе является признаком

самоподобия. Также в обоих случаях коэффициенты корреляции первых лагов k имеют значения близкие к единице, а нормированная АКФ имеет тенденцию периодическому повторению, как и сама трафиковая трасса. В дополнение высокие значения показателя Херста, демонстрируют самоподобие исследуемых исходного и агрегированного случайных процессов.

Используя результаты вычисления параметра Херста, рассчитаем теоретическую автокорреляционную функцию по формуле (2.2), где H – параметр Херста, и построим ее график. Расчеты теоретических коэффициентов корреляции проводились для двух значений параметра Херста (для интенсивностей исходного и агрегированного трафика), иллюстрационные материалы приведены на рис. 2.7.

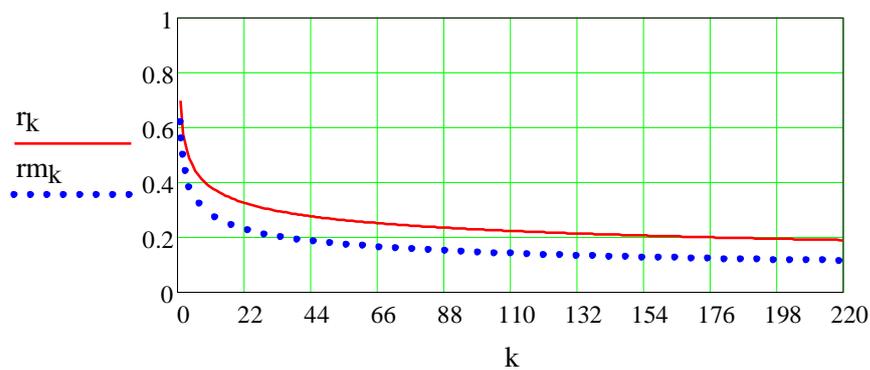


Рис. 2.7. Теоретический коэффициент корреляции интенсивности *исходного* при $H=0,882$ (линия) и *агрегированного* трафика при $H=0,847$ (точки), в одноадресном режиме передачи

Обе кривые, изображенные на графике рис. 2.7 гиперболически затухают на всем промежутке значений оси k , следуя логике рассуждений, приведенных выше, можем охарактеризовать рассматриваемые процессы как долговременно зависимые.

Анализ статистических характеристик интенсивности трафика сети IPTV многоадресной передачи

Принимая во внимание механизмы формирования видеотрафика [26, 32, 48], имеющие сильное отличие от широкополосного трафика данных и

мультимедийного трафика Интернет, проведем статистический анализ интенсивности видеотрафика IPTV.

Обобщая выполненные в предыдущем подпункте мероприятия по анализу статистических характеристик, можно получить **Методику определения наличия и степени самоподобия мультимедийного трафика**, заключающуюся в пошаговом выполнении следующих действий.

1. Расчет m -агрегированного временного ряда X^m .
2. Расчет коэффициентов корреляции $r(k)$ и построение нормированной АКФ исходной трафиковой трассы.
3. Расчет коэффициентов корреляции $r^{(m)}(k)$ и построение нормированной АКФ агрегированной трафиковой трассы.
4. Оценка параметра Херста исходных и агрегированных последовательностей трафиковых последовательностей.
5. Расчет теоретических коэффициентов корреляции; сравнение нормированных теоретической АКФ и АКФ рассчитанной по выборке для исходной и агрегированной последовательности трафика.

График интенсивности трафика многоадресной передачи агрегированного по блокам размера $m=5$ представлен на рис. 2.8. Как и в предыдущем подпункте, присутствует заметное сходство исходного (рис. 2.3) и агрегированного ряда.

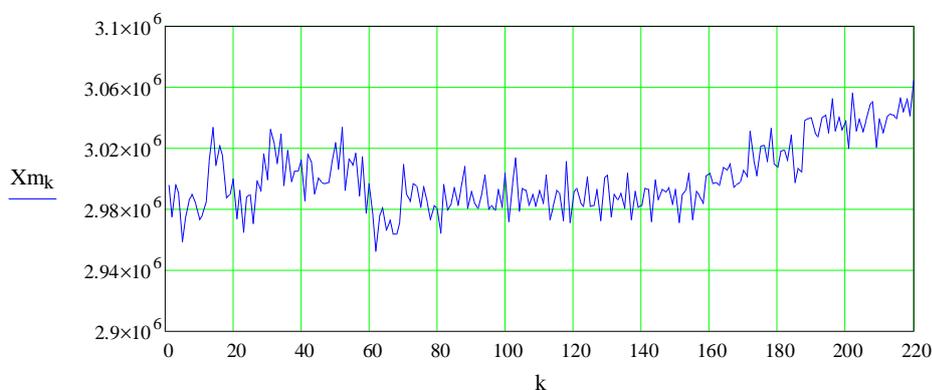


Рис. 2.8. Интенсивность *агрегированного* мультимедийного трафика многоадресной передачи (IPTV)

После вычисления агрегированного ряда, выполним расчеты коэффициентов корреляции трафика многоадресной передачи. Автокоррелограммы, построенные по рассчитанным коэффициентам корреляции приведены на рис. 2.9.

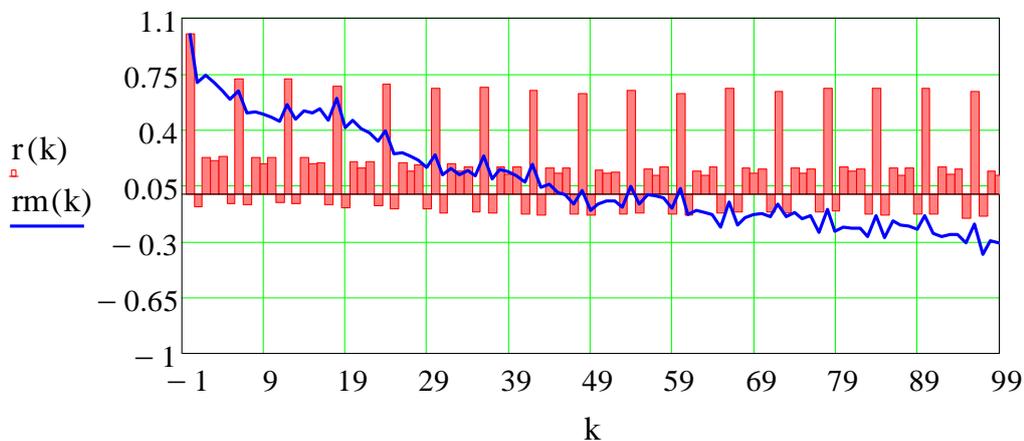


Рис.2.9. Коэффициент корреляции *исходного* (столбики) и *агрегированного* (линия) трафика, при многоадресном режиме передачи

По характерам изменения коэффициента корреляции исходной и агрегированной трафиковых трасс трудно сделать вывод о их самоподобной природе, т.к. коэффициент корреляции исходной последовательности имеет сильно периодический характер с трудно прослеживаемой тенденцией к гиперболическому затуханию, а коэффициент корреляции агрегированной последовательности затухает, периодически уходя в область отрицательных значений.

Следуя шагам описанной выше методики, произведем оценку параметра Херста интенсивности исходного и агрегированного видеотрафика IPTV. С помощью формул R/S -анализа получим следующие значения:

- исходный ряд интенсивности многоадресной передачи – 0,744;
- агрегированный ряд интенсивности многоадресной передачи – 0,783.

Далее рассчитаем и построим теоретическую автокорреляционную функцию исходного и агрегированного ряда интенсивности многоадресной

передачи. Графики нормированных теоретических АКФ исходной и агрегированной последовательности отражены на рис. 2.10.

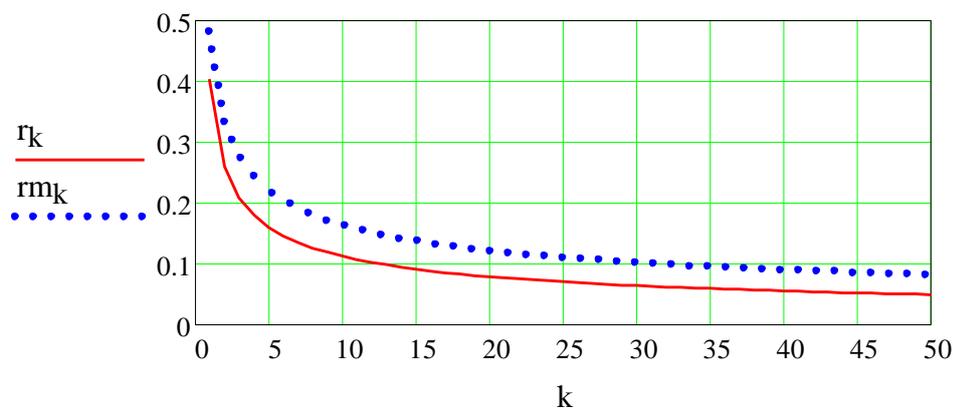


Рис. 2.10. Теоретический коэффициент корреляции интенсивности *исходного* при $H=0,744$ (линия) и *агрегированного* трафика при $H=0,783$ (точки), в многоадресном режиме передачи

Характер поведения кривых (рис. 2.10) и огибающей нормированной АКФ на рис. 2.9, позволяет говорить о том, что оба метода анализа подтверждают в данном случае самоподобный характер анализируемого трафика. Заметим, что величина значений коэффициентов корреляции теоретической корреляционной функции имеет прямую зависимость от значений параметра Херста, т.е. чем выше значение параметра Херста, тем выше значения коэффициентов корреляции при одинаковых лагах и медленнее затухание корреляционной функции.

Изучая результаты вычислений показателя Херста, можно отметить, что для реализаций интенсивности мультимедийного трафика $H>0,5$. Следует подчеркнуть, что несколько способов определения самоподобия было выбрано неслучайно: R/S -анализ и исследование коэффициентов корреляции были применены для получения более адекватных результатов в условиях мультифрактальности [91]. Мультифрактал – это неоднородный фрактальный объект, для корректного описания которого необходимо изучение неограниченного спектра фрактальных параметров [91]. Известно, что метод оценки параметра Херста, в частности R/S -анализ, порой дает некорректные

результаты, особенно при значении H близком к 0,5, во избежание ошибок с неверными оценками, дополнительно исследуется коэффициент корреляции.

Однако, для интенсивности трафика одноадресной передачи в обоих случаях (исходный и агрегированный трафик) тенденция распределения интенсивности будет повторяться, что соответствует суточным ЧНН. Напротив, интенсивность трафика многоадресной передачи не привязана к ЧНН и ее распределение не зависит от времени суток.

2.3 Исследование статистических характеристик мультимедийного трафика при анализе узлов МСС как СМО

2.3.1 Методика регистрации мультимедийного трафика на узлах МСС

Повсеместно происходит переход на сети, предоставляющие комплекс услуг TriplePlay, в которых передача всех видов контента идет в объединенном потоке (видеотрафик IPTV, Internet, IP телефония), как правило, по проводным телекоммуникационным сетям: сети xDSL, PON и Ethernet. При этом существование большого количества разных сервисов в одном физическом канале может приводить к перегрузке коммутационного оборудования. Для предотвращения частичного или полного отказа оборудования доступа и абонентского оборудования в следствии увеличения трафиковой нагрузки необходимо проводить контроль сети и оптимизацию параметров оконечного абонентского оборудования. Развитие телекоммуникационных сетей, связанное с внедрением новых сервисов и технологий, постоянно вносит изменения в структуру обслуживаемого трафика. Чаще всего приводятся результаты анализа степени самоподобия и влияния самоподобных свойств на показатели качества обслуживания для речевого IP-трафика [34, 84], исследования же мультимедийных потоков встречаются значительно реже, хотя наибольший объем глобальных сетей занимает мультимедийный трафик. В [3] показано, что

рост мультимедийного трафика, в том числе трафика IPTV, в глобальной инфокоммуникационной сети не достиг пика и в перспективе тенденция к его постоянному увеличению.

Основные методы изучения и данные о статистическом характере трафика современных инфокоммуникационных сетей базируются на анализе его интенсивности [80, 90, 91], подобные исследования проводились в данной работе в пункте 2.2. При этом в традиционных телекоммуникационных (телефонные, телеграфные) сетях эффективность работы оценивается на основе математических методов СМО, где для анализа применяют такие характеристики как интервалы времени между поступлениями пакетов и интервалы времени обслуживания. Изучению мультисервисных сетей как систем массового обслуживания посвящены ряд работ, в том числе [13, 62, 73].

Для получения наиболее полной информации о статистических свойствах трафика мультимедийных приложений необходимо исследовать характеристики потоков, передаваемых на различных уровнях МСС. Для этих целей проведена регистрация трафика по схеме, представленной на рис. 2.11. Для сбора интересующих нас параметров трафика был использован ПК с установленным ПО WireShark [57].

Фиксирование трафика производится в двух точках, определяющих функционирование сети на разных уровнях: в точке ТМ 1 – регистрация на уровне доступа, в точке ТМ 2 – на абонентском оборудовании доступа.

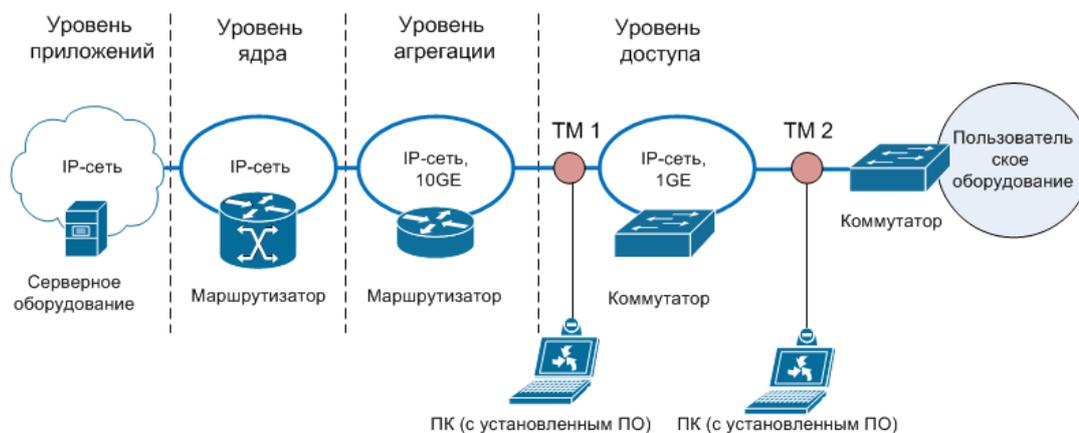


Рис. 2.11. Схема регистрации трафика на узле доступа МСС

Сбор пакетов на выходном интерфейсе *узла доступа* в точке ТМ 1 выполнен методом зеркалирования порта на скорости передачи 1 Гбит/с. В результате зарегистрирована и обработана последовательность, состоящая из 100 000 пакетов. Подробная схема и описание метода регистрации трафика на *абонентском оборудовании доступа* приведены в подпункте 2.3.3.

2.3.2 Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика узла доступа МСС

Экспериментальным путем на уровне доступа были получены реализации четырех случайных процессов: а именно, интервалов времени между пакетами объединенного мультимедийного трафика и видеотрафика IPTV и интервалов времени обслуживания объединенного мультимедийного трафика и видеотрафика IPTV. На рис. 2.12 приведены реализации исходной и агрегированной трасс интервалов времени между поступлениями пакетов, а на рис. 2.13 реализации исходной и агрегированной трасс интервалов времени обслуживания пакетов мультимедийного трафика узла доступа, где:

– X_i – интервалы времени между поступлением пакетов и интервалы времени обслуживания исходной последовательности;

– Xm_k – интервалы времени между поступлением пакетов и интервалы времени обслуживания агрегированной последовательности;

– i, k – номер отсчета.

Агрегированные ряды получены способом, описанным в предыдущем пункте, усредняя исходный ряд по неперекрывающимся блокам размера $m=10$.

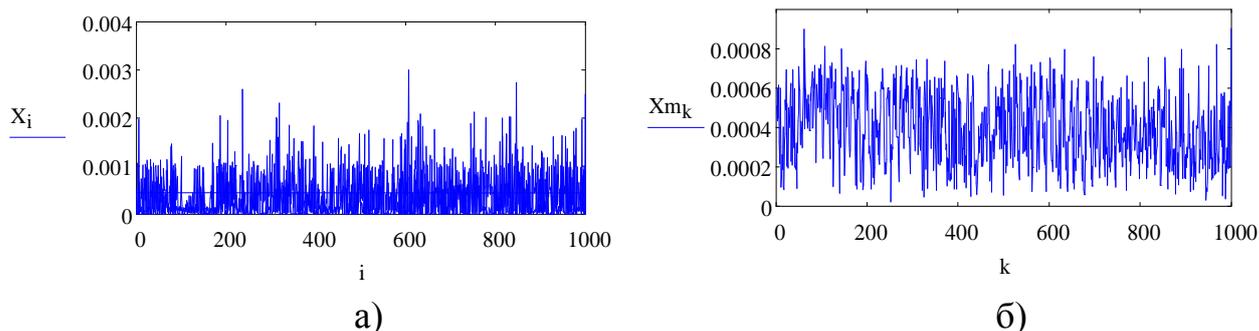


Рис. 2.12. Реализация последовательности интервалов времени между поступлениями пакетов объединенного трафика узла *доступа* а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

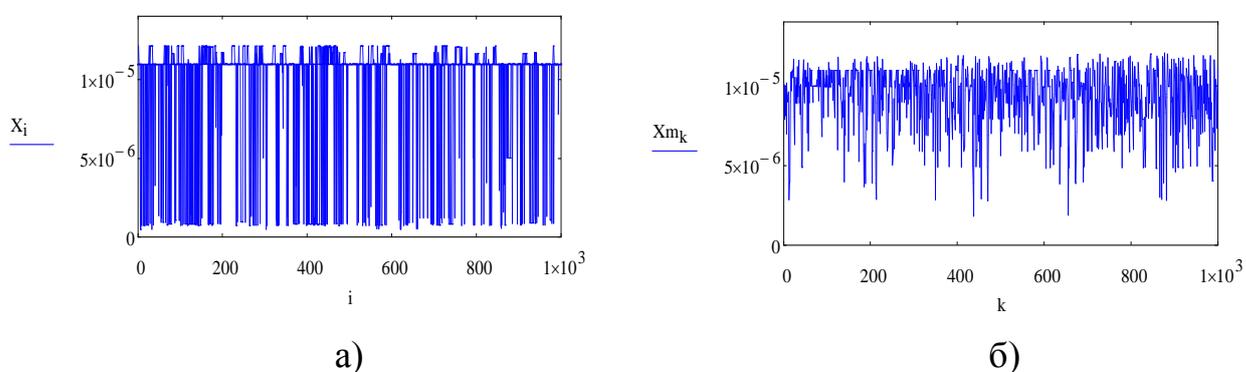
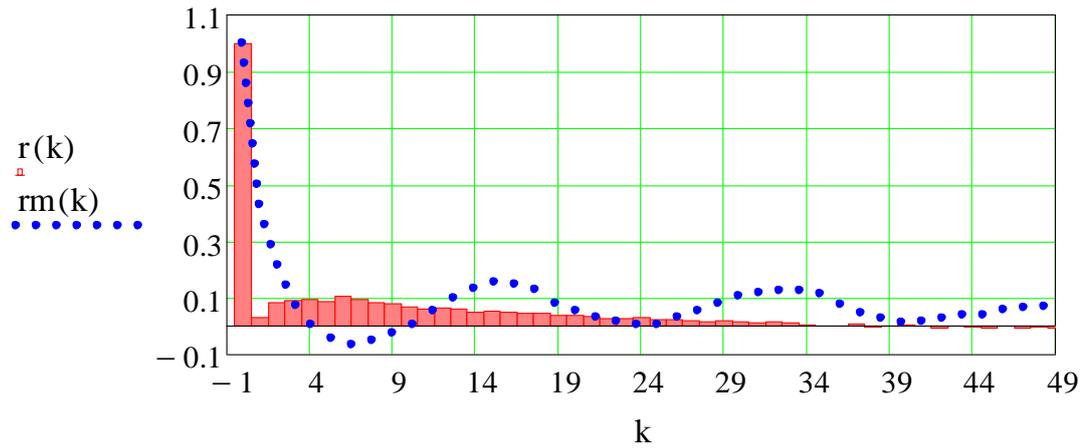
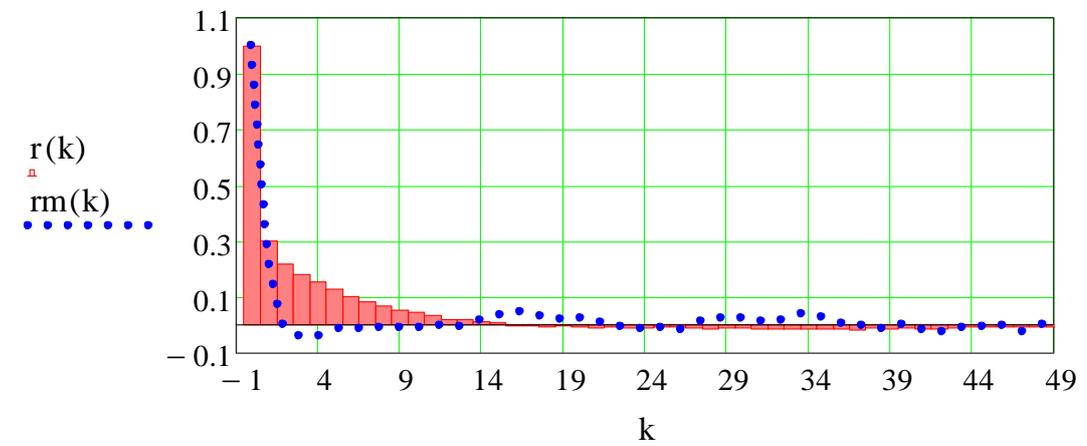


Рис. 2.13. Реализация последовательности интервалов времени обслуживания объединенного трафика узла *доступа* а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

Дальнейшие исследования статистических характеристик уместно продолжить расчетом и анализом коэффициентов корреляции экспериментально полученных *локально-стационарных случайных процессов*, обладающих свойством *эргодичности*. Математические расчеты нормированной АКФ произведены по формулам (2.9) и (2.10). Графики, иллюстрирующие результаты расчетов, приведены на рис. 2.14.



а)



б)

Рис. 2.14. Коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного (столбики) и агрегированного (точки) объединенного трафика узла доступа; б) интервалов времени обслуживания пакетов исходного (столбики) и агрегированного (точки) объединенного трафика узла доступа

Дальше выполним анализ реализаций исходных и агрегированных случайных процессов интервалов времени между поступлениями пакетов и времени обслуживания для *видеотрафика IPTV* узла доступа, которые приведены на рис. 2.15 и 2.16:

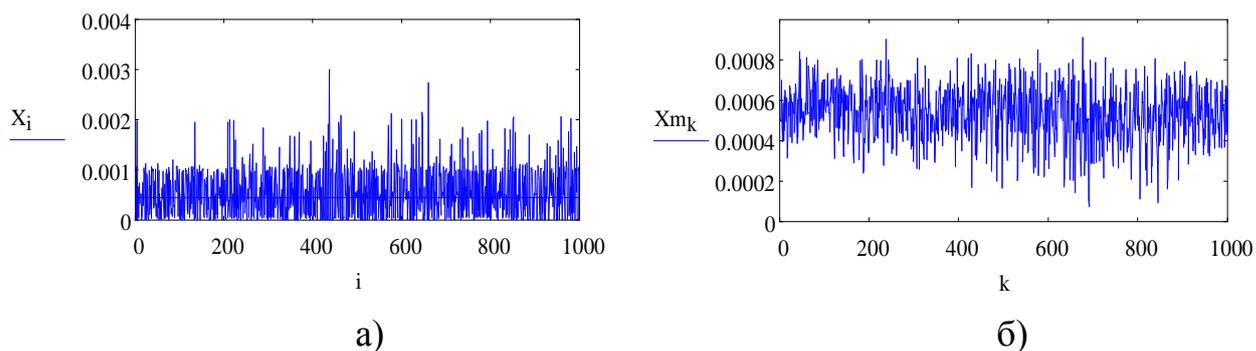


Рис. 2.15. Реализация последовательности интервалов времени между поступлениями пакетов видеотрафика IPTV узла *доступа* а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

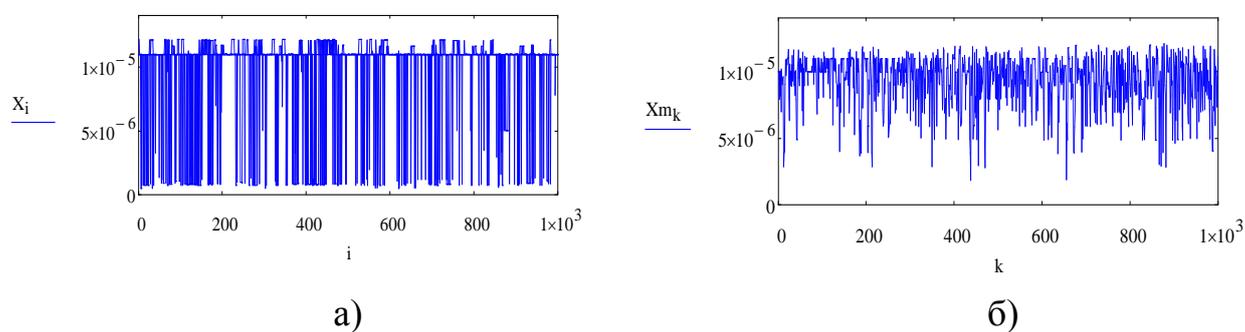
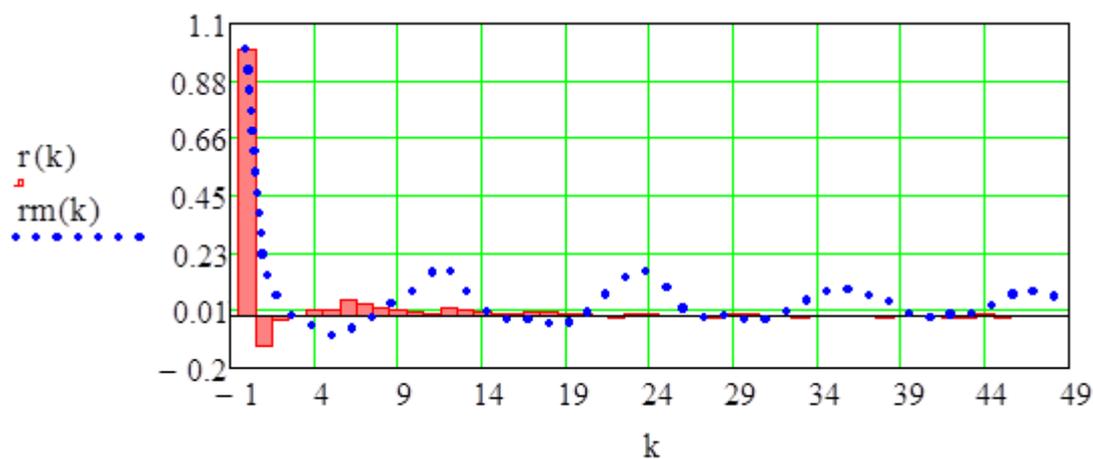
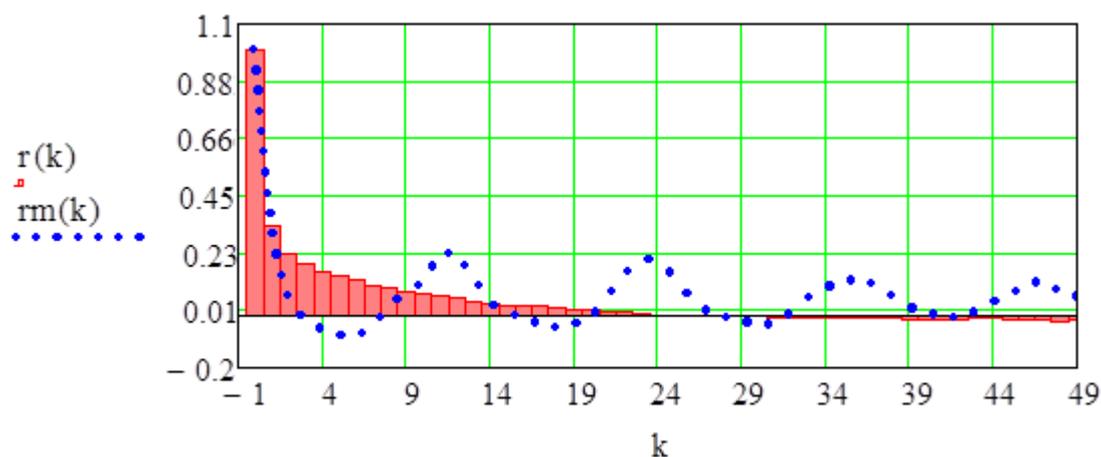


Рис. 2.16. Реализация последовательности интервалов времени обслуживания объединенного видеотрафика IPTV узла *доступа* а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

Расчет коэффициентов корреляции для выделенного видеотрафика IPTV произведен аналогично расчету коэффициентов корреляции объединенного трафика. Графики коэффициентов корреляции, полученных экспериментальных случайных процессов, проиллюстрированы на рис. 2.17.



а)



б)

Рис. 2.17. Коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного (столбики) и агрегированного (точки) видеотрафика IPTV узла доступа; б) интервалов времени обслуживания пакетов исходного (столбики) и агрегированного (точки) видеотрафика IPTV узла доступа

Графики нормированных АКФ агрегированных рядов, приведенные на рис. 2.14 и рис. 2.17, демонстрируют скрытые периодические процессы зарегистрированных последовательностей. Наличие периодичности нормированных АКФ агрегированных последовательностей (рис. 2.14, рис. 2.17) можно считать косвенным признаком самоподобия.

Следующим этапом вычислим значение параметра Херста для трафика узла доступа методом нормированного размаха. Расчетные значения параметра

Херста исходных и агрегированных трафиковых рядов интервалов времени между пакетами и времени обслуживания сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Значения параметров Херста для трафика узла доступа.

Исследуемый ряд		Параметр Херста, H
Объединенный трафик	Интервалы времени между пакетами, исходный ряд	0,650
	Интервалы времени между пакетами, агрегированный ряд	0,658
	Интервалы времени обслуживания, исходный ряд	0,582
	Интервалы времени обслуживания, агрегированный ряд	0,549
Видеотрафик IPTV	Интервалы времени между пакетами, исходный ряд	0,597
	Интервалы времени между пакетами, агрегированный ряд	0,628
	Интервалы времени обслуживания, исходный ряд	0,657
	Интервалы времени обслуживания, агрегированный ряд	0,639

Соблюдая выбранную методику исследования, принятую в пункте 2.2, дадим оценку теоретическим коэффициентам корреляции наблюдаемых процессов, рассчитав их по формуле (2.2), и проиллюстрируем полученные результаты соответствующими графиками на рис. 2.18 и рис. 2.19.

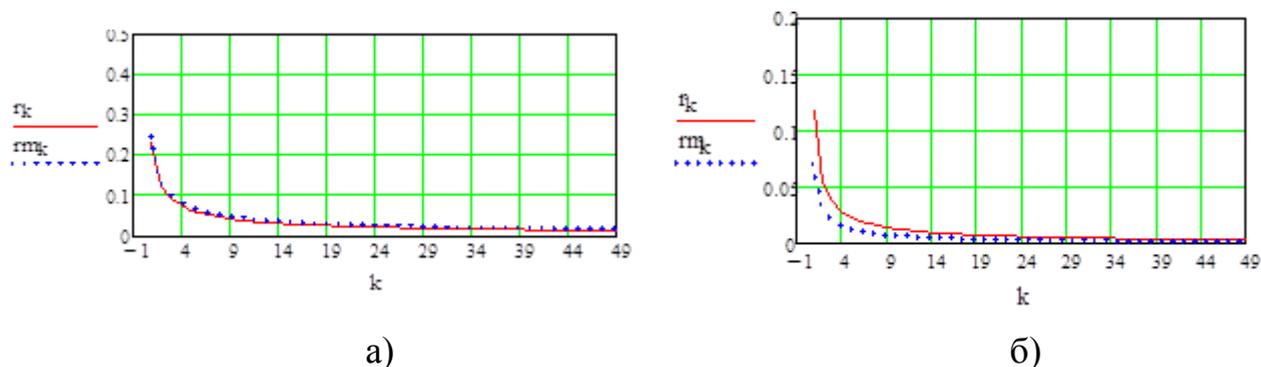


Рис. 2.18. Теоретический коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного при $H=0,650$ (линия) и агрегированного при $H=0,658$ (точки) объединенного трафика узла доступа; б) интервалов времени обслуживания исходного при $H=0,582$ (линия) и агрегированного при $H=0,549$ (точки) объединенного трафика узла доступа

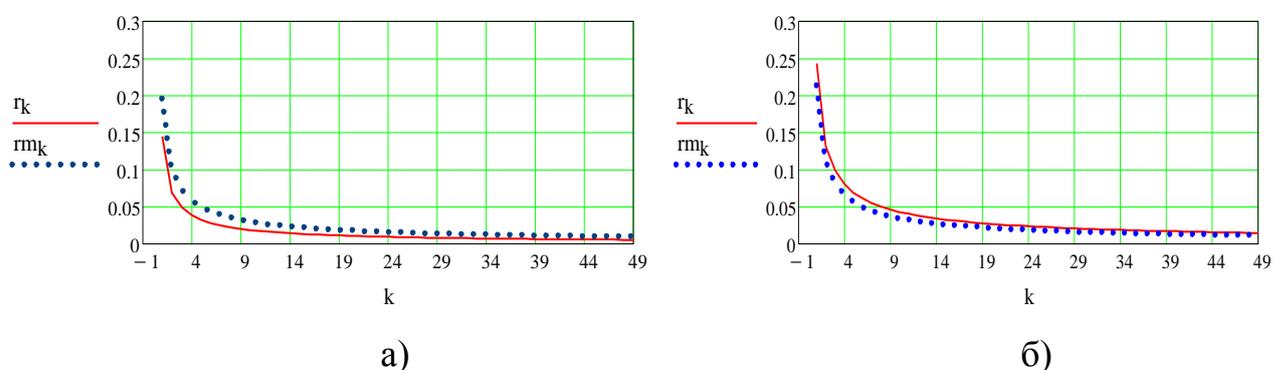


Рис. 2.19. Теоретический коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного при $H=0,650$ (линия) и агрегированного при $H=0,658$ (точки) видеотрафика IPTV узла доступа; б) интервалов времени обслуживания исходного при $H=0,582$ (линия) и агрегированного при $H=0,549$ (точки) видеотрафика IPTV узла доступа

Результаты проведенного корреляционного анализа и анализа R/S -статистики последовательностей трафика узла доступа свидетельствуют о довольно слабом самоподобии анализируемых последовательностей

2.3.3 Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика абонентского оборудования доступа МСС

Трафик, создаваемый абонентами и сетевым оборудованием нижних уровней, дает все больший вклад в общую загрузку абонентского оборудования доступа. Глобальное увеличение пользователей мультимедийных услуг влечет

резкое возрастание среднего количества информации, приходящейся на одного пользователя. При этом существенная часть приложений требует обеспечения строгого соблюдения политик качества обслуживания (QoS) [2], а абонент – предоставления качественного контента (QoE) [109].

Услуга IPTV организуется конкретным провайдером с гарантированными параметрами QoS, в то время как Internet TV может быть доступно пользователю в виде стандартного сервиса сети Internet. Основные статистические характеристики и законы распределения трафика Internet TV описаны в [73]. В настоящем подпункте проведен сравнительный анализ статистических характеристик мультимедийного трафика на входе абонентского коммутатора, ПК, ресивера IPTV.

Суть эксперимента заключается в регистрации трафика на разных участках существующей пользовательской сети, согласно схеме, изображенной на рис. 2.20. Точки мониторинга расположены таким образом, что: в точке ТМ 1 регистрируется объединенный пользовательский трафик, за исключением IP-телефонии, в ТМ 2 – трафик Internet, ТМ 3 – видеотрафик IPTV. Для обеспечения регистрации трафика в точке ТМ 3 на участке сети коммутатор – ресивер включен концентратор. Сбор трафика реализован в условиях имитации поведения пользователя, т.е. просмотр и регулярное переключение каналов (переключение *multicast* групп). Ранее упоминалось, что поведение пользователя является одним из определяющих факторов, воздействующих на характер распределения трафика в инфокоммуникационной сети. В работах [2, 25, 126] показано, что распределение пользовательских запросов и времени обдумывания обладает чрезвычайной степенью флуктуаций в широком диапазоне временных масштабов.

В поставленном эксперименте скорость передачи пакетов на всех портах анализируемого оборудования 100 Мбит/с, количество членов суммарного полученного ряда 100 000 пакетов.

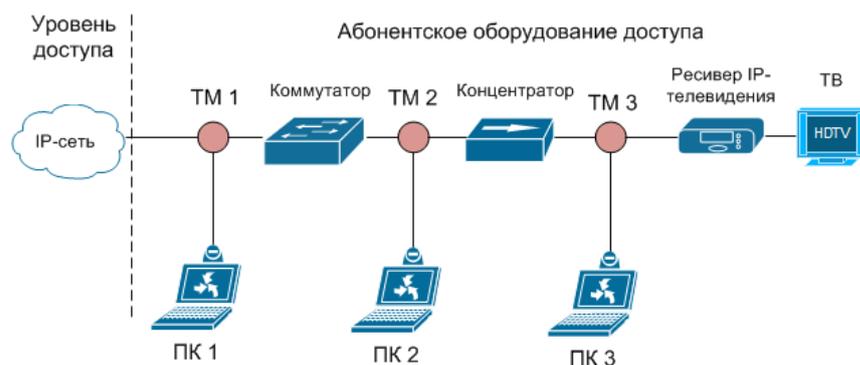


Рис. 2.20. Схема регистрации трафика на абонентском оборудовании доступа МСС

Реализации шести случайных процессов, полученных экспериментальным путем с абонентского уровня с помощью ПО Wireshark, приведены на рис. 2.21 – 2.26.

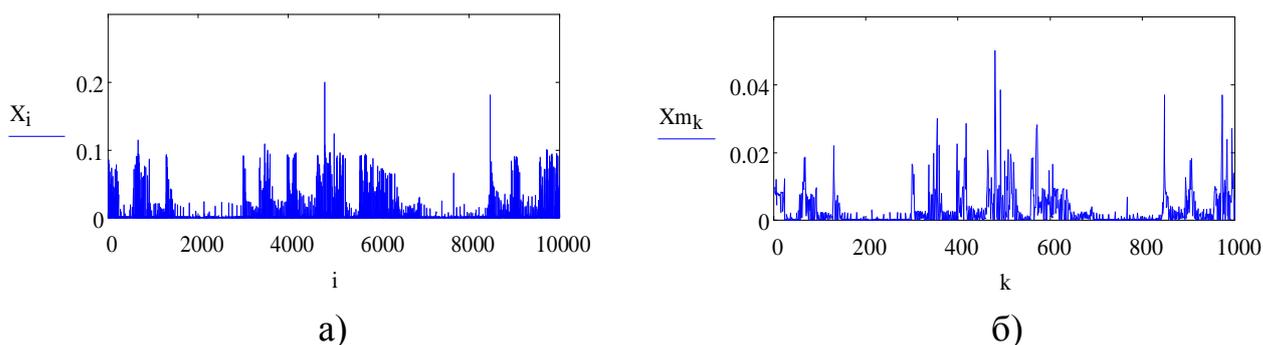


Рис. 2.21. Реализация последовательности интервалов времени между поступлениями пакетов объединенного трафика абонентского оборудования доступа а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

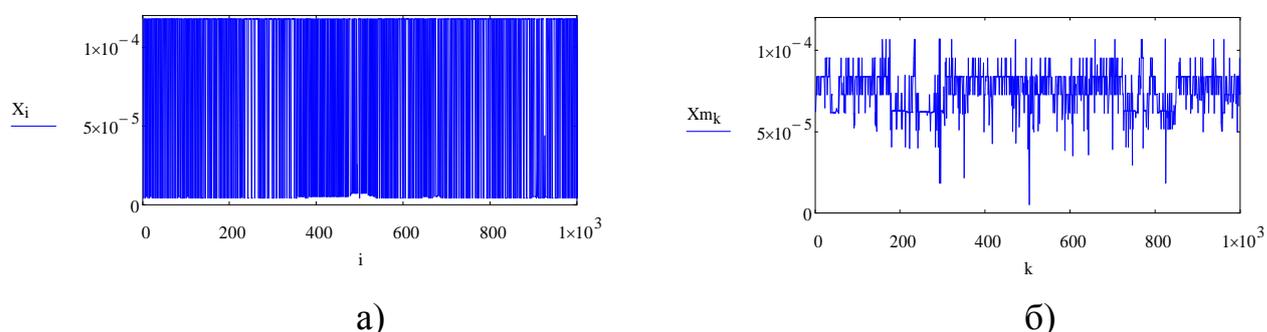


Рис. 2.22. Реализация последовательности интервалов времени обслуживания объединенного трафика абонентского оборудования доступа а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

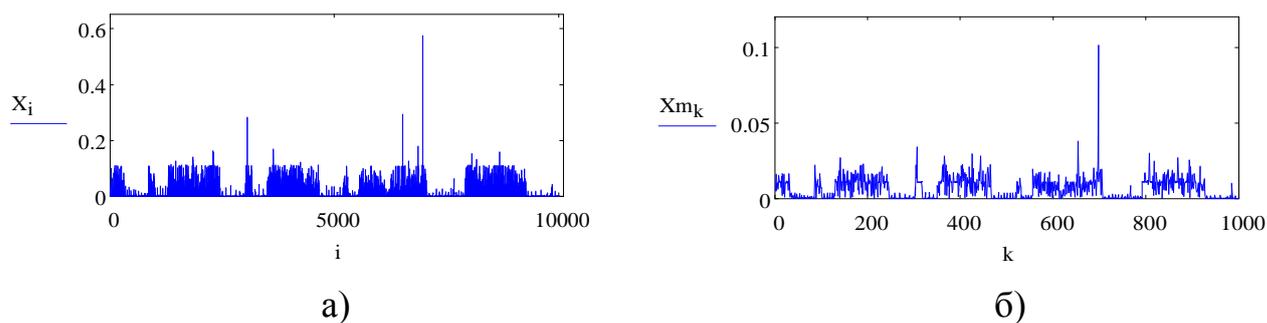


Рис. 2.23. Реализация последовательности интервалов времени между поступлениями пакетов трафика Internet абонентского оборудования доступа
а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

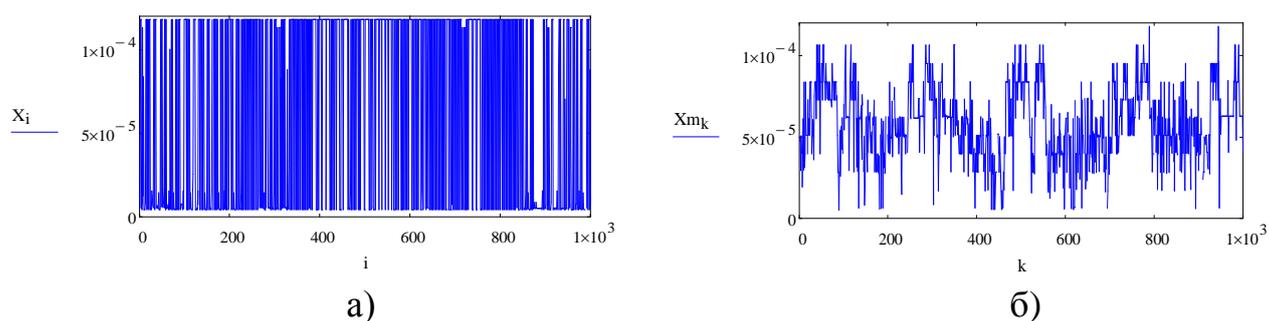


Рис. 2.24. Реализация последовательности интервалов времени обслуживания трафика Internet абонентского оборудования доступа
а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

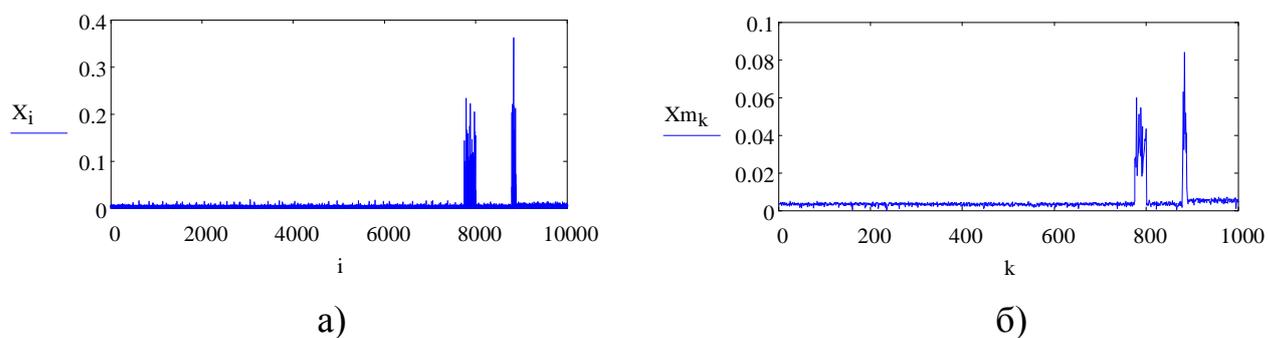


Рис. 2.25. Реализация последовательности интервалов времени между поступлениями пакетов видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа
а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

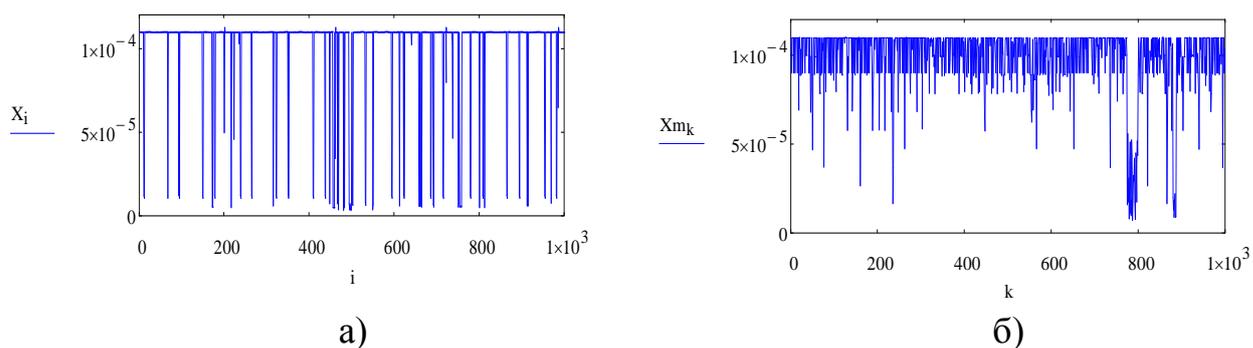


Рис. 2.26. Реализация последовательности интервалов времени обслуживания видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа

а) исходная последовательность; б) агрегированная последовательность

Проанализировав реализации *исходного* трафика (рис. 2.21 а), рис. 2.22 а), рис. 2.23 а), рис. 2.24 а), рис. 2.25 а), рис. 2.26 а)), можно говорить о некоторых характерных моментах, присущих определенному типу трафика. Так всплески интенсивности трафика, связанные с изменением поведения пользователя (например, переключение каналов), соответствуют всплескам продолжительных интервалов времени между пакетами, когда в устоявшемся режиме просмотра передач для IPTV (рис. 2.25 а)) интервалы времени между пакетами практически не выходят за пределы значений в 15 мс. В случае объединенного трафика и Internet (рис. 2.21 а), рис. 2.23 а)) большая доля интервалов времени лежит в пределах 100-150 мс, правда количество отсчетов, выходящих за данные границы существенно.

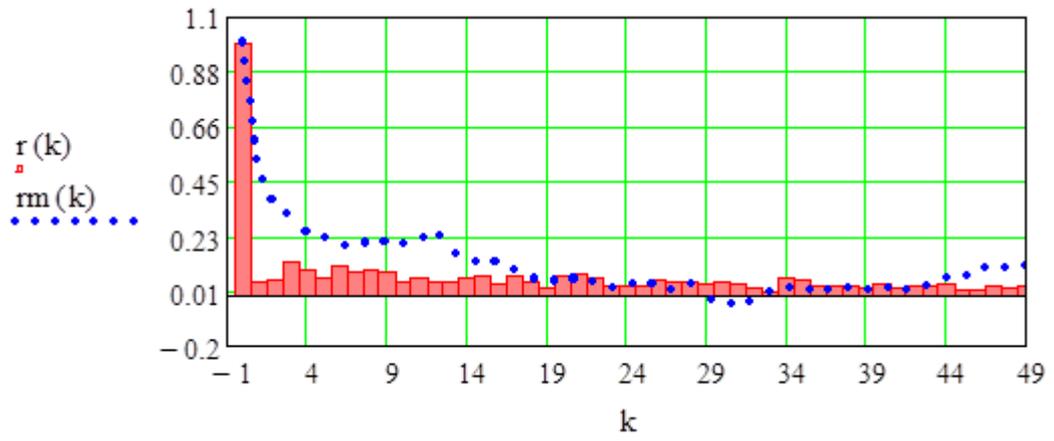
Реализации последовательностей интервалов времени между поступлениями пакетов исходного и агрегированного трафика имеют незначительные различия в структуре, связанные с плотностью поступления пакетов (рис. 2.21 а) и б), рис. 2.23 а) и б), рис. 2.25 а) и б)).

Тенденции в реализациях интервалов времени обслуживания удобно проследить по агрегированным последовательностям трафика. Эти тенденции выражены в сильном разбросе значений времени обработки объединенного и Internet трафика [$1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$ с], когда время обработки пакетов агрегированной реализации видеотрафика IPTV имеет незначительное

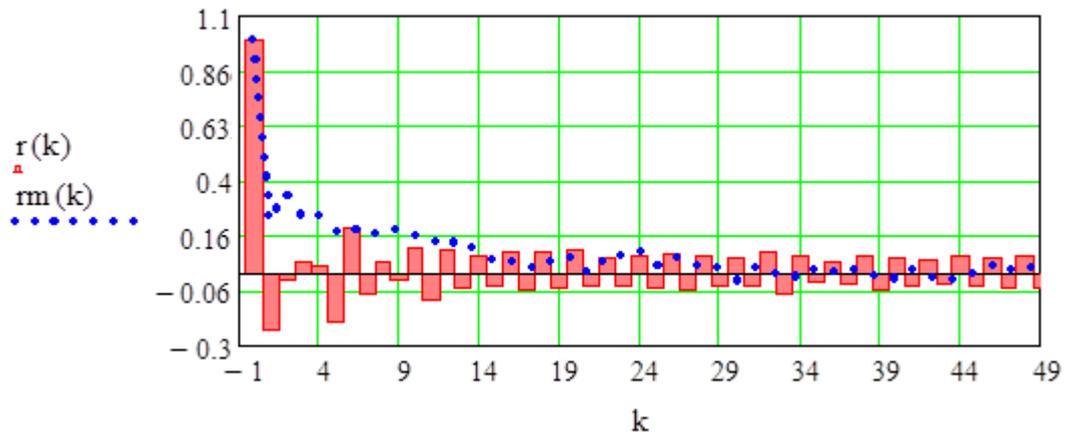
количество всплесков вниз, т.е. большая часть значений заключена в интервале $[8 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}]$.

Трафик Internet имеет нестабильную структуру в сравнении с трафиком IPTV, поскольку трафик IPTV передается пользователю по выделенному каналу, и служебная управляющая информация поступает лишь в моменты запросов [73]. В то время как для трафика Internet характерно регулярное поступление служебных пакетов наряду с информационными, что придает потоку оттенок периодичности и оказывает весомое влияние на характер объединенного трафика.

Далее для трафиковых последовательностей, изображенных на рис. 2.21 – рис. 2.26 выполним расчет коэффициентов корреляции и построим нормированные АКФ [64, 66, 75], а также вычислим параметр Херста. Результаты корреляционного анализа, представлены в виде автокоррелограмм и изображены на рис. 2.27 – 2.29. Значения параметров Херста, рассчитанные методом R/S -анализа сведены в таблицу 2.3.



а)



б)

Рис. 2.27. Коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного (столбики) и агрегированного (точки) объединенного трафика абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания пакетов исходного (столбики) и агрегированного (точки) объединенного трафика абонентского оборудования доступа

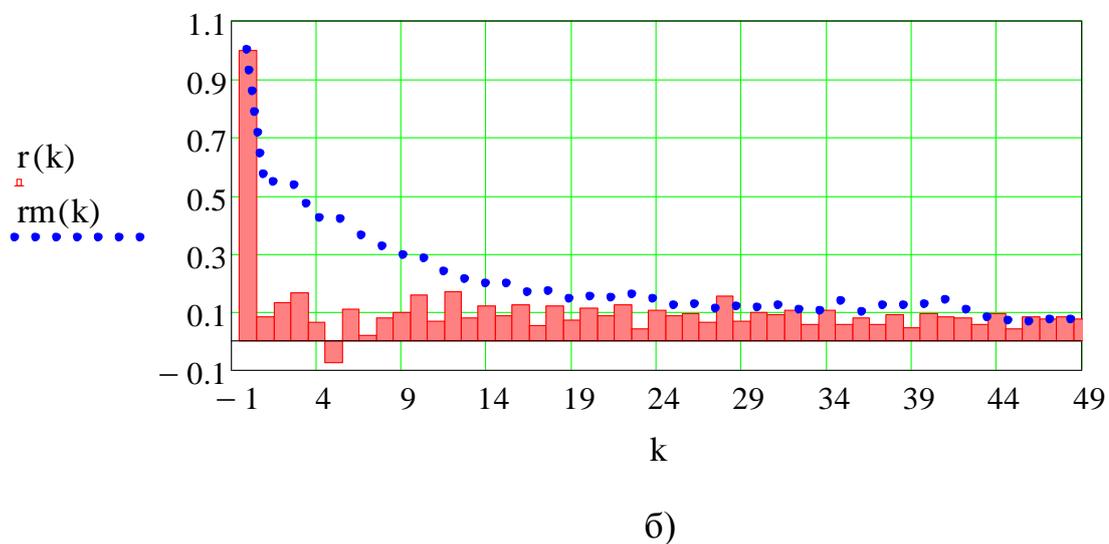
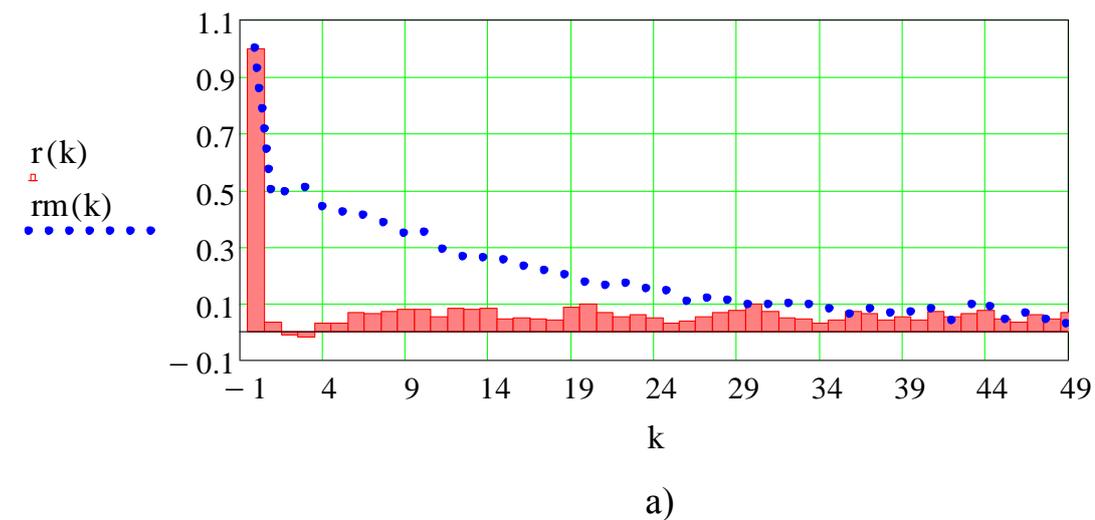
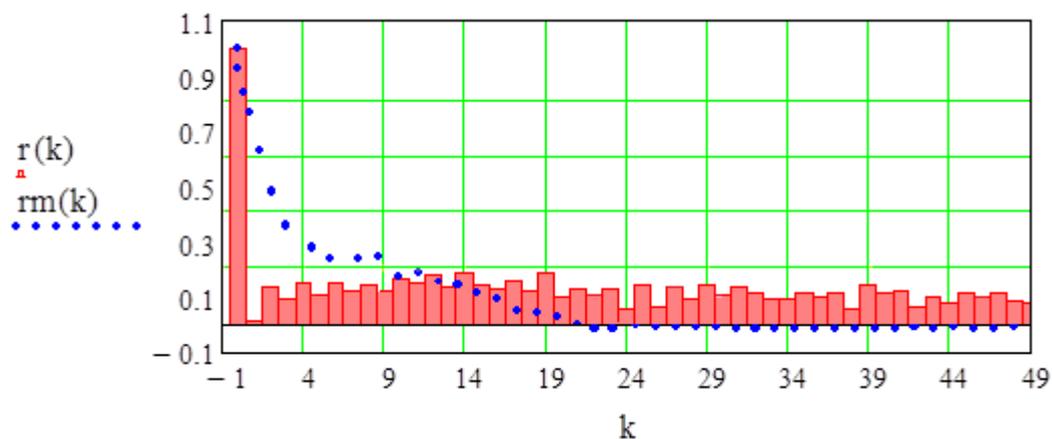
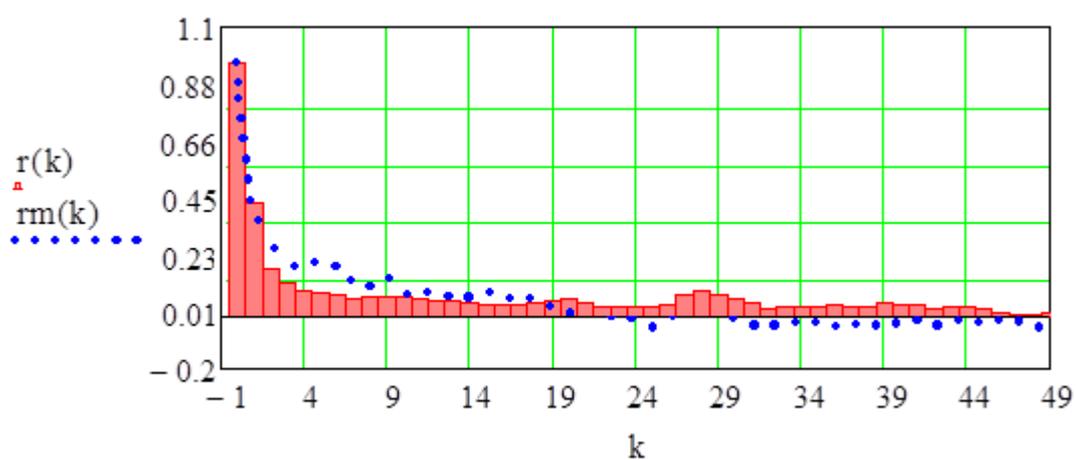


Рис. 2.28. Коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного (столбики) и агрегированного (точки) Internet трафика абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания пакетов исходного (столбики) и агрегированного (точки) Internet трафика абонентского оборудования доступа



а)



б)

Рис. 2.29. Коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного (столбики) и агрегированного (точки) видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания пакетов исходного (столбики) и агрегированного (точки) видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа

Представленные на рис. 2.27 – 2.29 графики коэффициентов корреляции характеризуются слабовыраженным трендом с достаточно быстрым гиперболическим затуханием. Графики исходных реализаций, приведенные на рис. 2.27 а), б) и рис. 2.28 а), б), рис. 2.29 а), б) можно говорить о слабой корреляционной связи процессов. Что касается графиков коэффициентов корреляции агрегированных реализаций, изображенных на рис. 2.27 а), б), рис. 2.28 а), б), рис. 2.29 а), б), то их тренд прослеживается в более явной степени, однако уже на первых лагах показывает невысокие значения 0,32-0,5.

Таблица 2.3. Значения параметров Херста для трафика абонентского оборудования доступа.

Исследуемый ряд		Параметр Херста, H
Объединенный трафик	Интервалы времени между пакетами, исходный ряд	0,672
	Интервалы времени между пакетами, агрегированный ряд	0,692
	Время обслуживания, исходный ряд	0,631
	Время обслуживания, агрегированный ряд	0,670
Трафик Internet	Интервалы времени между пакетами, исходный ряд	0,662
	Интервалы времени между пакетами, агрегированный ряд	0,674
	Время обслуживания, исходный ряд	0,680
	Время обслуживания, агрегированный ряд	0,680
Видеотрафик IPTV	Интервалы времени между пакетами, исходный ряд	0,739
	Интервалы времени между пакетами, агрегированный ряд	0,735
	Время обслуживания, исходный ряд	0,722
	Время обслуживания, агрегированный ряд	0,704

Все значения параметров Херста из таблицы 2.3 укладываются в интервал $0,5 < H < 1$, что свидетельствует о самоподобном характере исследуемого трафика. Из таблицы видно, что величины H реализаций объединенного и Internet трафика примерно равны, тогда как видеотрафик IPTV принимает более высокие значения H , следовательно видеотрафик IPTV обладает более высокой степенью самоподобия.

Оценим коэффициенты корреляции, полученные на основе теоритической формулы (2.2) для известных значений параметра Херста. Результаты расчетов теоретических коэффициентов корреляции представлены в виде графиков рис. 2.30 – рис. 2.32.

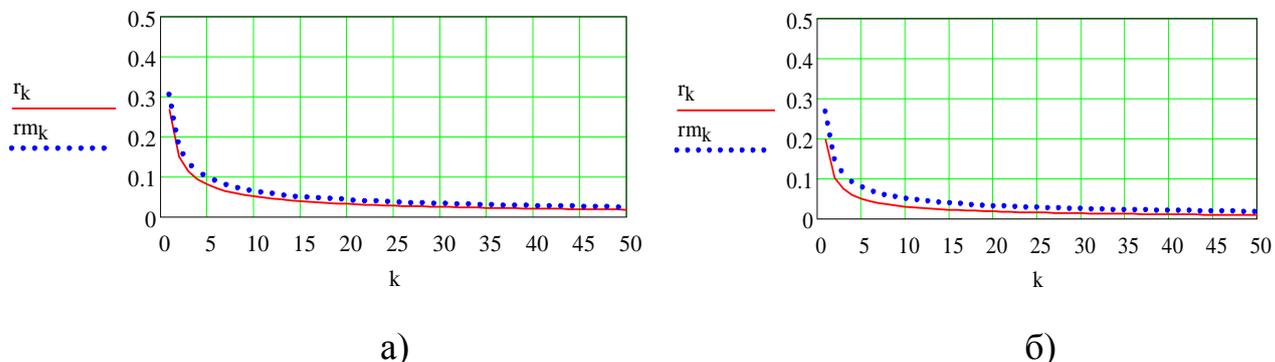


Рис. 2.30. Теоретический коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного при $H=0,672$ (линия) и агрегированного при $H=0,692$ (точки) объединенного трафика абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания исходного при $H=0,631$ (линия) и агрегированного при $H=0,670$ (точки) объединенного трафика абонентского оборудования доступа

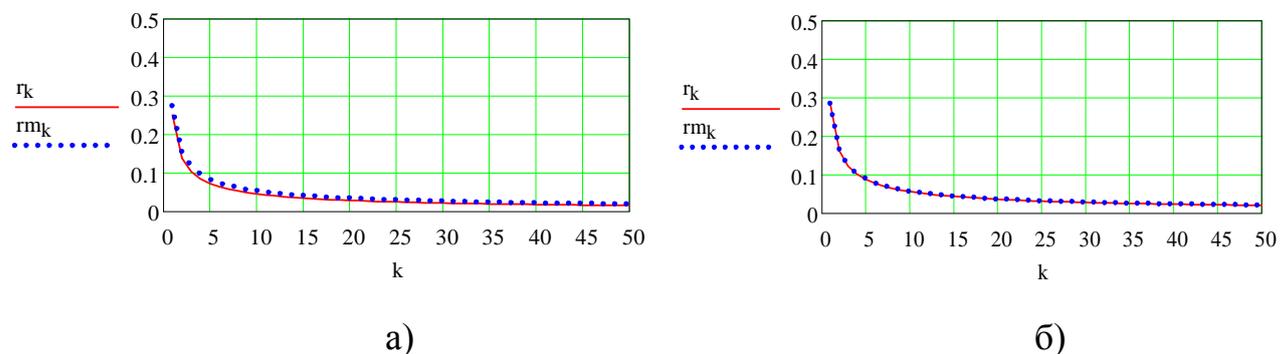


Рис. 2.31. Теоретический коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного при $H=0,662$ (линия) и агрегированного при $H=0,674$ (точки) Internet трафика абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания исходного при $H=0,680$ (линия) и агрегированного при $H=0,680$ (точки) Internet трафика абонентского оборудования доступа

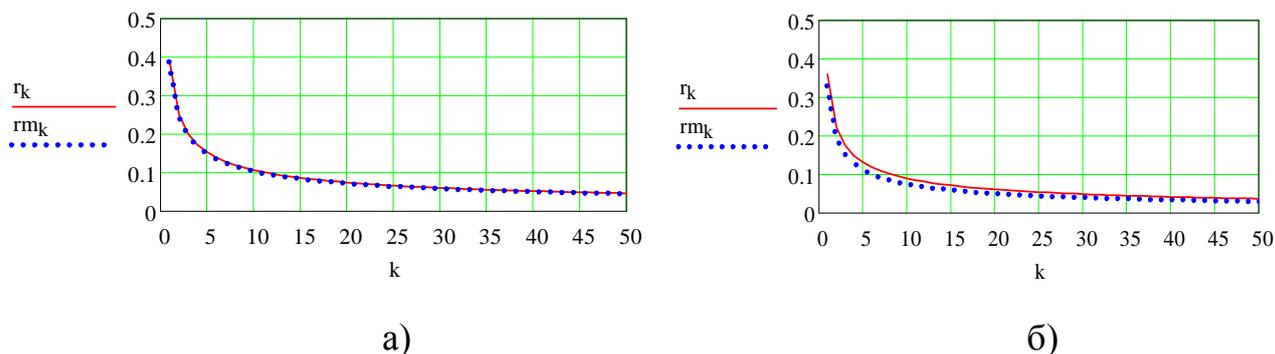


Рис. 2.32. Теоретический коэффициент корреляции а) интервалов времени между пакетами исходного при $H=0,732$ (линия) и агрегированного при $H=0,735$ (точки) видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа; б) интервалов времени обслуживания исходного при $H=0,722$ (линия) и агрегированного при $H=0,704$ (точки) видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа

Опираясь на результаты приведенные в [91] и результаты полученные в диссертационной работе, можно констатировать, что все исследованные реализации трафика – самоподобны в широком смысле согласно условию (2.5). Действительно, для значений коэффициентов корреляции теоретических корреляционных функций (рис. 2.30 – рис. 2.32) выполняется соотношение $r(k) \approx r^{(m)}(k)$. Однако, обратим внимание на одну из анализируемых пар графиков: а именно, графики коэффициентов корреляции исходных интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания пакетов видеотрафика IPTV на рис. 2.29 а), б) и соответствующие им графики теоретических коэффициентов корреляции самоподобного трафика на рис. 2.32 а), б). Сравнение данных графиков не позволяет однозначно идентифицировать самоподобие анализируемого трафика, т.к. не просматривается соответствие нормированной АКФ рассчитанной по выборке и теоретической нормированной АКФ.

Полученные результаты показывают, что последовательности мультимедийного трафика (в т. ч. видеотрафика IPTV) не обладают свойствами простейших потоков, и для адекватной оценки функционирования узлов обслуживания мультимедийного трафика следует применять модели ТМО типа $G/G/1$ или $G/G/n$ [35, 36, 96].

2.4 Выводы по главе

Вторая глава диссертации посвящена анализу статистических характеристик мультимедийного трафика инфокоммуникационной МСС. На основе перечисленных в данной главе источников литературы были определены основные направления исследований, применяемых современной наукой для анализа мультимедийного трафика. Данный этап работы предусматривал два подхода:

1. Анализ интенсивностей (трафиковых трасс) мультимедийного трафика, зарегистрированных примерно в течение суток на узле доступа.

2. Анализ интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания применяемых ТМО для расчетов основных вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных устройств и сетей.

В исследовании была разработана и применена методика определения самоподобных свойств реального мультимедийного трафика на основе совокупной оценки параметра Херста и исследования корреляционных свойств и вероятностных распределений временных параметров трафика.

В ходе исследования выяснилось, что самоподобие трафика при объединении потоков сохраняется как на абонентском уровне, так и уровне доступа, это свойство присутствует в широком диапазоне условий [20, 98, 121] независимо от скорости передачи и корреляционных свойств трафика. Известно, что долговременная зависимость, установленная в одной из последовательностей смеси влечет ДВЗ всей смеси последовательностей, разумеется с другими значениями статистических характеристик. Обратим внимание на то, что статистические характеристики трафика изменяют свои значения при переходе от уровня к уровню, а именно:

1. Графики нормированных АКФ последовательностей трафика абонентского оборудования доступа убывают медленнее в сравнении с АКФ уровня доступа.

2. Значения параметров Херста для последовательностей трафика абонентского оборудования выше значений параметров Херста для аналогичных характеристик трафика уровня доступа.

Следует отметить, что определенное на основе совокупной оценки параметра Херста и корреляционной функции самоподобие интенсивностей трафика в режимах одноадресной и многоадресной передачи проявляется в более высокой степени, чем для характеристик трафика, используемых теорией массового обслуживания, таких как интервалы времени между пакетами и интервалы времени обслуживания.

Результаты, полученные в данной главе, можно применять при формировании адекватных моделей трафика и аналитических расчетов параметров коммутационных узлов. Раздельное изучение различного по природе трафика позволяет подобрать конкретное распределение вероятностей для каждой временной характеристики. Данный факт позволяет сделать тщательный расчет систем и узлов телекоммуникаций для каждого исследованного типа трафика в отдельности, что в итоге позволит повысить эффективность работы сетевых устройств.

3 АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

3.1 Методы теории вероятностей в исследовании распределений современного телекоммуникационного трафика МСС

3.1.1 Понятие статистического ряда и гистограмм

При работе с большими выборками (тысячи и десятки тысяч отсчетов) простая статистическая совокупность становится неудобной формой представления статистического материала. Рассмотрим результаты наблюдений над случайной величиной X , оформленные в виде статистического ряда. Разделим весь диапазон имеющихся значений X на интервалы и подсчитаем количество значений m_i , приходящееся на каждый i -й разряд, полученное число разделим на общее число наблюдений n и определим частоту, соответствующую данному разряду:

$$p_i = \frac{m_i}{n}.$$

Сумма частот всех разрядов должна быть равна единице.

Число разрядов, на которые следует группировать полученные случайные последовательности, необходимо выбирать рационально, иначе ряд распределения становится неявным, и его частоты приобретают незакономерные колебания. Также разрядов не должно быть мало, т.к. при малом числе разрядов свойства распределения описываются случайной последовательностью с большим искажением. Чем шире и однороднее статистический материал, тем большее число разрядов можно выбирать при составлении статистического ряда. Длины разрядов могут быть равными и различными, как правило удобнее использовать равные. Однако при оформлении выборок случайных величин, распределенных неравномерно, бывает удобно выбирать в области наибольшей плотности распределения разряды более узкие, чем в области малой плотности [15].

В исследованиях часто возникает необходимость в представлении статистического ряда в виде гистограммы. Для построения гистограммы нужно частоту каждого разряда разделить на его длину и полученное число взять в качестве высоты столбца. В случае равных по длине разрядов высоты столбцов пропорциональны соответствующим частотам. Из способа построения гистограммы следует, что ее площадь равна единице [15].

Таким образом, построенная гистограмма является статистическим аналогом кривой распределения [15, 16].

Для примера на рис. 3.1 приведена гистограмма интенсивности трафика узла доступа в режиме передачи multicast.

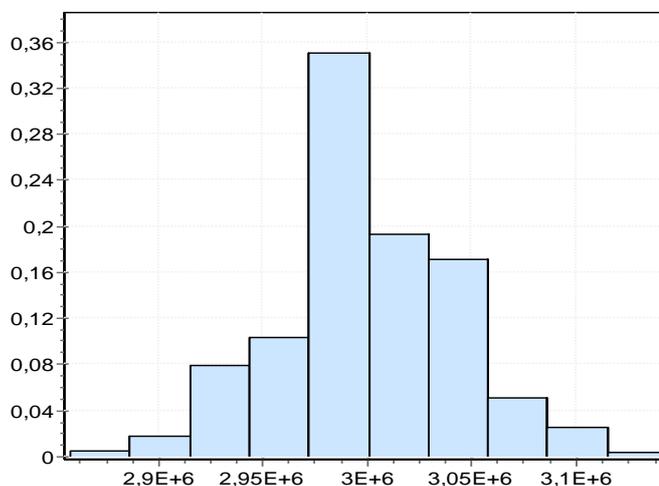


Рис. 3.1. Гистограмма распределения интенсивности трафика в режиме multicast

Очевидно, при увеличении числа опытов можно выбирать все более и более мелкие разряды, при этом гистограмма будет все более приближаться к некоторой кривой, ограничивающей площадь, равную единице. Нетрудно убедиться, что эта кривая представляет собой график плотности распределения величины X .

На основе данных статистического ряда, можно приближенно построить статистическую функцию распределения величины X .

3.1.2 Применение критериев согласия при аппроксимации гистограмм

Использование некоторых методов математического анализа мультисервисных сетей, обслуживающих мультимедийный трафик, влечет необходимость получения распределений плотностей вероятностей случайных величин [6]. Аппроксимация гистограмм, полученных экспериментально, имеет приближенный характер, и решение о соответствии практической гистограммы теоретической функции происходит на основании критериев согласия [44, 45] Колмогорова-Смирнова, Хи-квадрат (χ^2) и др.

При решении практических задач по анализу реальных трафиковых реализаций математический закон их распределений неизвестен. В таком случае выдвигается предположение о гипотетическом соответствии имеющегося эмпирического закона, построенного по экспериментальным выборкам, некоторому теоретическому. Данная гипотеза требует статистической проверки в результате которой она либо подтвердится, либо опровергнется.

Критерий согласия Хи-квадрат

Исследуем случайную величину X , для которой необходимо проверить гипотезу H о том, что данная случайная величина подчиняется закону распределения $F(x)$. Произведем выборку из n независимых наблюдений трафиковой последовательности и по ней построим эмпирический закон распределения $F'(x)$. Соответствие эмпирического закона гипотетическому можно оценить, используя критерий согласия χ^2 [19, 43]:

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(p_i^t - p_i^e)^2}{p_i^t},$$

где N – число отсчетов экспериментального ряда;

p_i^t – вероятность попадания значения случайной величины в i -й интервал для теоретического закона распределения;

p_i^e – вероятность попадания значения случайной величины в i -й интервал для эмпирического закона распределения, которая должна соответствовать распределению χ^2 ;

i – номер интервала.

Если полученное значение превосходит квантиль распределения χ^2 с количеством степеней свободы $k-p-1$ (k – число наблюдений, p – число оцениваемых параметров закона распределения) при заданном уровне значимости, то гипотеза H отвергается. В обратном случае гипотеза принимается на заданном уровне значимости.

Рассмотрим выражение:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(m_i - np_i^0)^2}{np_i^0}. \quad (3.1)$$

Видим, что χ^2 представляет собой квадрат расстояния между двумя r -мерными векторами: вектором относительных частот $\left(\frac{m_1}{n}, \dots, \frac{m_r}{n}\right)$ и вектором вероятностей (p_1, \dots, p_r) .

Рассмотрим поведение критерия χ^2 , когда гипотеза H верна, и когда гипотеза H неверна.

Если гипотеза H верна, то на асимптотическое поведение χ^2 при $n \rightarrow \infty$ указывает теорема К. Пирсона.

Когда гипотеза H неверна, формула (3.1), согласно закону больших чисел принимает вид:

$$\sum_{i=1}^r \frac{(m_i - np_i^0)^2}{np_i^0} \rightarrow n \cdot \sum_{i=1}^r \frac{(p_i - p_i^0)^2}{p_i^0}. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) равно 0, тогда если H неверна, то $\chi^2 \rightarrow \infty$, при $n \rightarrow \infty$. Следовательно, гипотеза H должна быть отвергнута, когда полученное в опыте значение χ^2 слишком велико, т.е. наблюдаемое значение χ^2 превосходит критическое значение.

Критерий согласия Колмогорова-Смирнова

Пусть X – исследуемая трафиковая реализация, с размером выборки n .
Примем некоторые обозначения:

- $G(x)$ – истинная функция распределения, которой подчиняются наблюдения;
- $F_n(x)$ – эмпирическая функция распределения;
- $F(x)$ – гипотетическая функция распределения.

Тогда гипотеза соответствия гипотетической функции истинной H записывается в виде: $G(x)=F(x)$. Если гипотеза H верна, то различие между F_n и F должно убывать с увеличением n .

Вследствие теоремы Бернулли $F_n(x) \rightarrow F(x)$ при $n \rightarrow \infty$. Чтобы показать сходство функций можно сравнить F_n и F в равномерной метрике, т.е. рассмотреть величину:

$$D_n = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F(x)|. \quad (3.3)$$

Очевидно, что D_n (3.3) – величина случайная, поскольку ее значение зависит от случайного распределения F_n . Если гипотеза H справедлива и $n \rightarrow \infty$, то $F_n(x) \rightarrow F(x)$ при любом значении x , а $D_n \rightarrow 0$. Если же гипотеза H неверна, то $F_n \rightarrow G$ и $G \neq F$.

Гипотеза H должна быть отвергнута, если экспериментально полученные значения статистики D_n будут большим, но для этого надо знать, как распределена статистика D_n , если $F = G$ при известных n и G . Одно из свойств величины D_n состоит в том, что, если $G = F$, т.е. гипотетическое распределение найдено правильно, то закон распределения статистики D_n оказывается одним и тем же для всех непрерывных функций G и зависит только от объема выборки n . Доказательство этого факта основано на том, что последовательность не изменяет своего значения при монотонных преобразованиях оси x . Используя такое преобразование, любое непрерывное распределение G можно превратить в равномерное на отрезке $[0;1]$. При этом

$F_n(x)$ перейдет в функцию распределения выборки из этого равномерного распределения.

Теорема Колмогорова гласит, что если гипотеза H справедлива и функция G непрерывна, то:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(\sqrt{n}D_n < z) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 z^2}.$$

При проверке гипотезы H , при $G = F$, требуется по первоначальной выборке вычислить значение статистики D_n по формуле:

$$D_n = \max_{1 \leq k \leq n} \left[\frac{k}{n} - F(x_k), F(x_k) - \frac{k-1}{n} \right],$$

где x_k – элементы вариационного ряда, построенного по исходной выборке.

Полученную величину D_n необходимо сравнить с рассчитанными по асимптотической формуле критическими значениями. Если полученное в опыте значение D_n превосходит выбранное критическое значение, соответствующее принятому уровню значимости, то гипотезу H приходится отвергать.

Критерий основывается на статистической модели, предполагающей непрерывность распределения, так что вероятность совпадения выборочных значений равна нулю, при этом критическая область – это множество решений статистического эксперимента, которые приводят к отклонению нулевой H гипотезы. При значении статистического критерия, превосходящего номинальное критическое значение, нулевая гипотеза отклоняется, если его величина меньше номинального критического значения, следует принять нулевую гипотезу.

Как и все критерии согласия, критерий Колмогорова-Смирнова предназначен для проверки согласия эмпирической и теоретической функций распределений.

Таким образом, адекватность критерия Колмогорова-Смирнова означает, что любое отличие экспериментальной выборки от теоретического распределения будет обнаружено, если анализируемая последовательность достаточно продолжительна во времени.

3.1.3 Функции программного обеспечения EasyFit

В работе рассматриваются трафиковые выборки до 100 000 пакетов. Чтобы получить распределение и проанализировать плотности вероятностей исходных последовательностей, необходимо построить их гистограммы. Существует несколько способов построения гистограмм: от ручного до множества машинных. В данной работе построение и аппроксимация гистограмм произведено с помощью программного обеспечения EasyFit [44].

EasyFit предназначен для автоматической аппроксимации различных распределений с помощью метода максимального правдоподобия (MLE). Оценка критериев согласия (GOF) осуществляется с помощью трех статистических критериев в соответствии с тестами подгонки: Колмогорова-Смирнова, Андерсона-Дарлинга и χ -квадрат. Перечислим несколько причин, послуживших выбору данного ПО.

1. EasyFit позволяет строить гистограммы и выбирать возможное распределение по наилучшему соответствию экспериментальным данным, что уменьшает время анализа на 70-95% в отличие от ручных методов.

2. EasyFit имеет большое количество дополнительных функций, разработанных для предотвращения ошибок при анализе и помощи в принятии решений.

3. EasyFit имеет интегрированную инфраструктуру для управления данными и анализа функций отчетности [44].

3.1.4 Аппроксимация функций распределения

Самоподобный характер мультимедийного трафика мультисервисных сетей затрудняет аналитические расчеты показателей качества функционирования с помощью классических методик ТМО. При этом, если решить задачу адаптации реальных измерений трафика под классические математические теории, то возможно получить новые аналитические

результаты исследований инфокоммуникационных сетей. Поэтому аппроксимация реальных функций плотности вероятностей интервалов времени между пакетами и времени обслуживания пакетов является актуальной задачей. Исследование проблем, связанных с аппроксимацией произвольных функций распределения, отражено в работах [5, 7, 52, 92, 103, 131].

3.2 Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для интенсивности мультимедийного трафика

Проведем исследование плотностей вероятностей интенсивности мультимедийного трафика в одноадресном и многоадресном режимах передачи.

С помощью ПО EasyFit построим гистограммы распределений случайных величин интенсивности, зарегистрированных на входе узла доступа. Для полученных гистограмм по критериям согласия Колмогорова-Смирнова были подобраны аппроксимирующие распределения из библиотеки EasyFit.

1. Гистограмма интенсивности трафика одноадресной передачи, изображенная на рис. 3.5, с наибольшей точностью аппроксимирована четырехпараметрическим распределением Джонсона (Johnson SB), где аналитическая запись плотности вероятностей имеет вид:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda \sqrt{2\pi z(1-z)}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\gamma - \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right)^2\right),$$

где γ, δ – непрерывные параметры формы ($\delta > 0$), λ – непрерывный масштабный коэффициент ($\lambda > 0$), ξ – непрерывный параметр сдвига, область определения функции: $\xi < x < \xi + \lambda$. Значения параметров: $\gamma = 0,22843$, $\delta = 0,47735$, $\lambda = 6660302,7$, $\xi = 1781196,9$. Распределение Джонсона изображено на рис. 3.5.

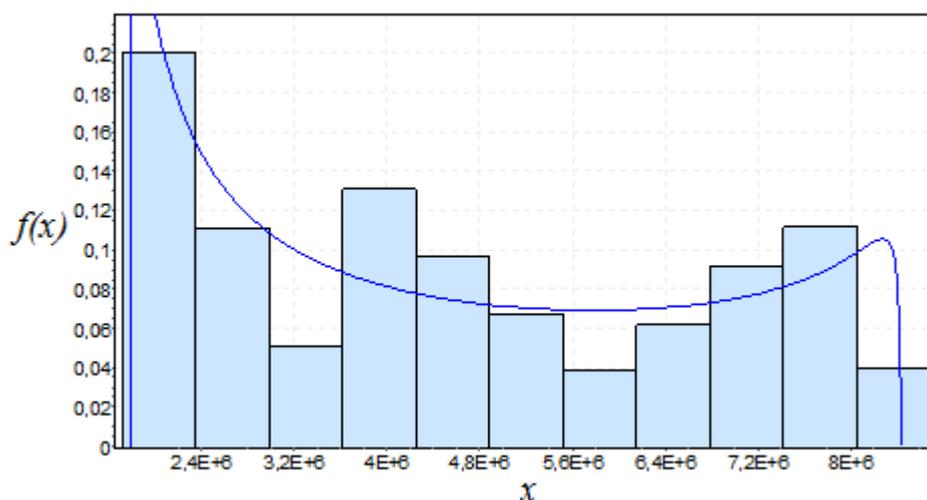


Рис.3.5. Плотность вероятностей интенсивности трафика узла доступа в режиме одноадресной передачи

Неравномерность распределения интенсивности пакетов (рис. 3.5) весьма существенна. Данный факт определяется механизмом формирования трафика одноадресной передачи (большой частью трафика Internet) и нестабильностью его востребованности в течение анализируемого промежутка времени.

2. Гистограмма интенсивности трафика многоадресной передачи (видеотрафика IPTV) согласно критерию Колмогорова-Смирнова с наибольшей точностью аппроксимирована распределением Коши (Cauchy) (рис. 3.6). Аналитическое выражение плотности вероятностей Коши имеет вид:

$$f(x) = \left(\pi \sigma \left(1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right) \right)^{-1},$$

где σ – непрерывный масштабный коэффициент ($\sigma > 0$), μ – непрерывный параметр распределения, область определения функции: $-\infty < x < +\infty$. Значение параметров $\sigma = 21802,17$, $\mu = 2997962,71$.

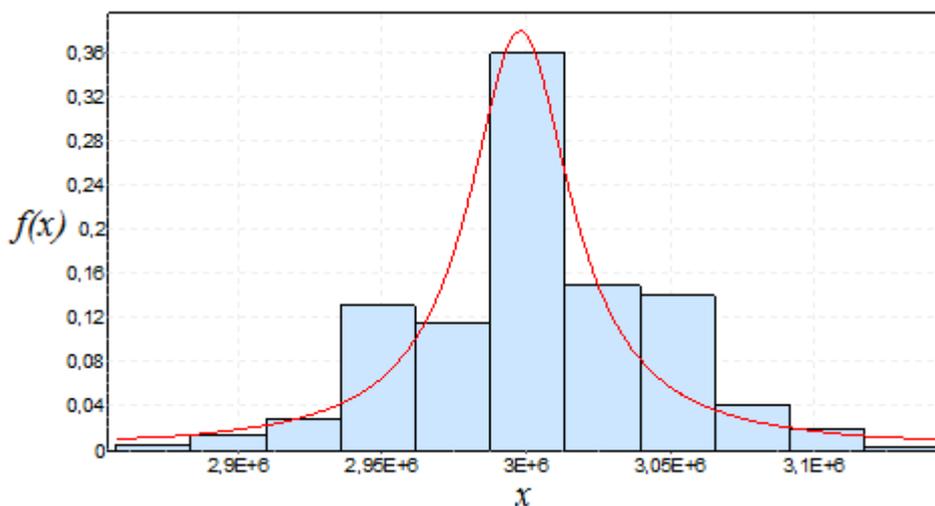


Рис.3.6. Плотность вероятностей интенсивности трафика узла доступа в режиме многоадресной передачи

Пик функции распределения (рис. 3.6) сосредоточен в интервале $[2,9875 \cdot 10^6 \div 3,0125 \cdot 10^6]$.

Резюмируя выводы по пункту 3.2, отметим, что частотность трафика в режиме одноадресной передачи не имеет ярко выраженного пика и распределена неравномерно. Напротив, в режиме многоадресной передачи интенсивность обладает характерным пиком распределения, при этом большая часть трафика сосредоточена вдоль оси $3,0 \cdot 10^6$, как показано на рис. 2.2.

3.3 Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для мультимедийного трафика узла доступа

Чтобы применить математические методы и аппарат ТМО для расчетов оптимальных характеристик телекоммуникационных узлов уровня доступа и абонентского оборудования доступа, необходимо получить распределение плотности вероятностей интервалов времени между пакетами и времени обслуживания пакетов трафика.

Для получения полной и адекватной картины распределения трафика узла доступа, необходимо провести исследование по крайней мере двух видов трафика: объединенного трафика и видеотрафика IPTV [62]. Такой подход к

организации исследования обусловлен необходимостью оценки влияния существенной доли видеотрафика в объединенном потоке на общую статистическую картину распределения случайных величин.

1. Проанализируем получившиеся плотности вероятностей исследуемых интервалов времени между пакетами и времени обслуживания пакетов.

Гистограммы распределения интервалов времени между пакетами в потоках объединенного трафика и выделенного видеотрафика IPTV уровня доступа, представлены на рис. 3.7 и 3.8 соответственно.

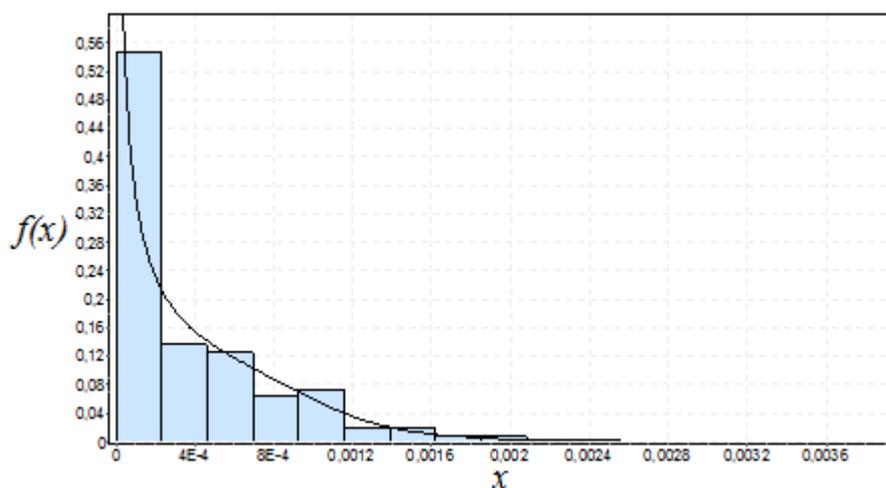


Рис. 3.7. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами объединенного трафика узла доступа

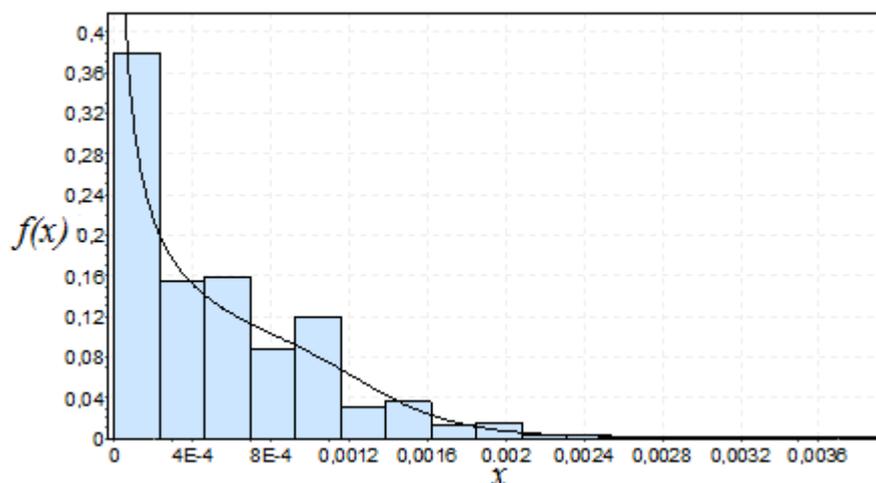


Рис. 3.8. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами выделенного видеотрафика IPTV трафика узла доступа

В обоих случаях по критериям согласия Колмогорова-Смирнова наилучшую аппроксимацию дают распределения Дагума (Dagum) с вероятностью 0,97 для рис. 3.7, и вероятностью 0,94 для рис. 3.8. Для распределения Дагума аналитическое выражение функции плотности вероятностей имеет вид:

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha k - 1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right)^{k+1}}, \quad (3.4)$$

где k, α – непрерывные параметры формы ($k > 0, \alpha > 0$), β – непрерывный масштабный коэффициент ($\beta > 0$), γ – непрерывный параметр сдвига, область определения функции: $\gamma \leq x < +\infty$. Параметры плотности вероятностей Дагума принимают следующие значения:

– интервалы времени между пакетами объединенного мультимедийного трафика $k = 0,08943$, $\alpha = 4,7431$, $\beta = 0,00116$, $\gamma = 0$;

– интервалы времени между пакетами выделенного видеотрафика IPTV $k = 0,08317$, $\alpha = 5,9069$, $\beta = 0,00144$, $\gamma = 0$.

Графическое и аналитическое сходство представленных распределений обусловлено большим объемом видеотрафика IPTV в объединенном мультимедийном потоке.

2. Анализ плотностей вероятностей времени обслуживания объединенного телекоммуникационного трафика и видеотрафика IPTV дал бимодальные распределения в виде гистограмм рис. 3.9 и 3.11 соответственно, с разнесенными в противоположные стороны пиками интервалов времени обслуживания. Функция плотности распределения для рис. 3.9 с малой долей вероятности удовлетворяет полученной гистограмме (на графике приведена). В таком случае появляется необходимость преобразования и повторного исследования исходной гистограммы.

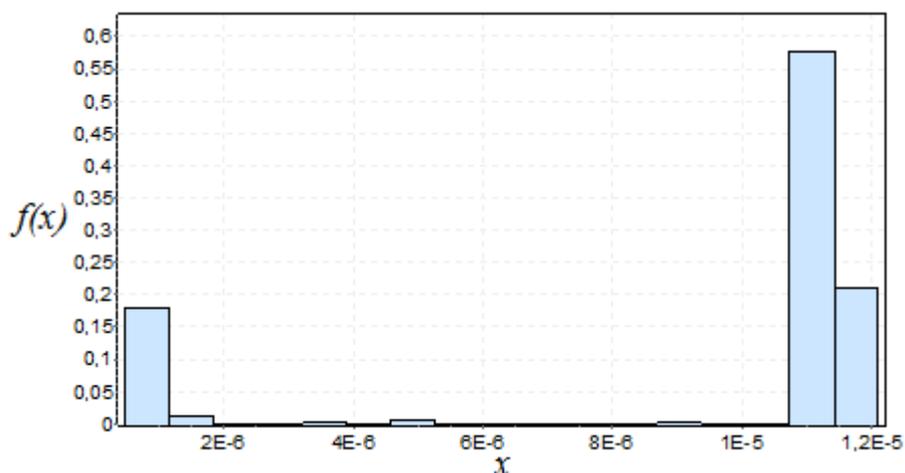


Рис. 3.9. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов объединенного трафика узла доступа

К гистограмме (рис. 3.9) разумно применить распределение смеси [50, 56], записанное в виде:

$$f(x) = P_1 \cdot f_1(x) + P_2 \cdot f_2(x), \quad (3.5)$$

где в качестве $f_1(x)$ можно взять дельта-функцию $\delta(x - x_1)$ в точке $x_1 = 1 \cdot 10^{-6}$ с, а $f_2(x)$ в интервале $[1,1 \cdot 10^{-5} \div 1,22 \cdot 10^{-5}$ с], уместнее повторно проанализировать ПО EasyFit, при исключении из общего статистического ряда «коротких» интервалов времени обслуживания $[0,4 \cdot 10^{-6} \div 1,2 \cdot 10^{-6}$ с]. Повторный анализ гистограммы измененного случайного ряда с точностью 64% дал аппроксимацию обобщенное Парето (Gen. Pareto), приведенную на рис. 3.10. Плотность вероятностей Парето имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \cdot \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right)^{-1 - \frac{1}{k}}, & k \neq 0; \\ \frac{1}{\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)}{\sigma} \right), & k = 0, \end{cases} \quad (3.6)$$

k – непрерывный параметр формы, σ – непрерывный масштабный коэффициент ($\sigma > 0$), μ – непрерывный параметр сдвига, значения параметров: $k = -2,6522$, $\sigma = 7,8772 \cdot 10^{-6}$, $\mu = 8,8148 \cdot 10^{-6}$. Область определения функции:

$$\begin{aligned} \mu \leq x < +\infty & \quad \text{при } k > 0; \\ \mu \leq x \leq \mu - \sigma/k & \quad \text{при } k < 0. \end{aligned}$$

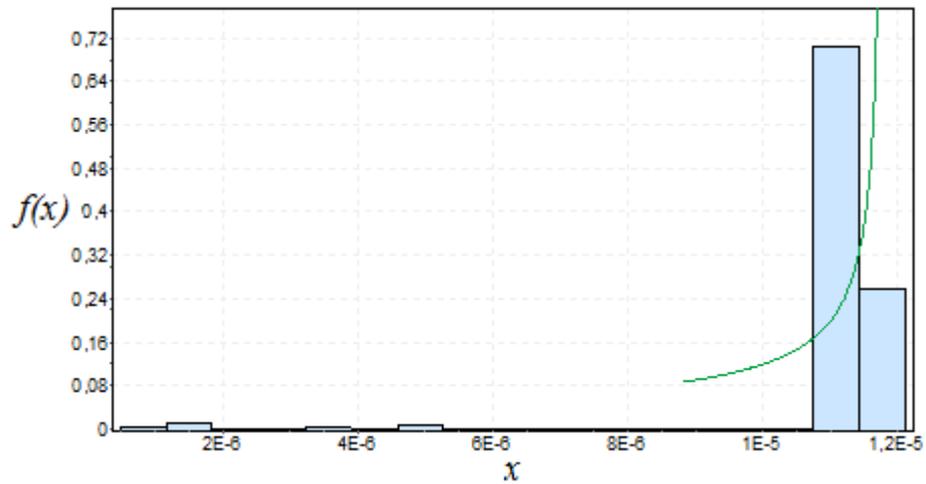


Рис. 3.10. Плотность вероятностей времени обслуживания «больших» пакетов объединенного трафика узла доступа

При этом значения «долей» приведенных распределений с учетом нормировки равны: $P_1 = 0,19$, $P_2 = 0,81$. Тогда, с учетом сделанного выбора запишем (3.5) в виде:

$$f(x) = 0,19 \cdot \delta(x - x_1) + 0,81 \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}},$$

Плотность вероятностей времени обслуживания выделенного IPTV трафика представлено на гистограмме рис. 3.11, как и в предыдущем примере, имеет бимодальное распределение – два пика, разнесенные в области $[0,5 \cdot 10^{-6} \div 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}]$ и $[1,1 \cdot 10^{-5} \div 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}]$.

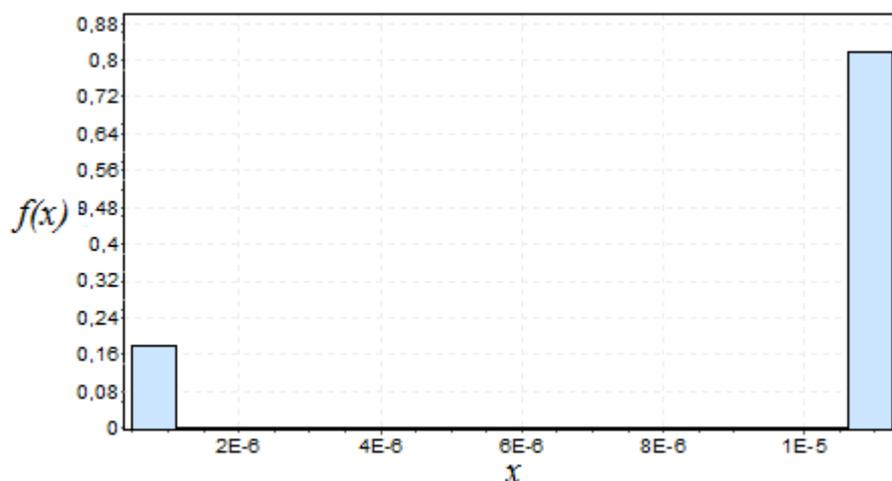


Рис. 3.11. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов выделенного видеотрафика IPTV узла доступа

Для случая, приведенного на рис. 3.11, можно предложить упрощенную аппроксимацию в виде распределения смеси:

$$f(x) = P_1 \cdot \delta(x - x_1) + P_2 \cdot \delta(x - x_2), \quad (3.7)$$

где $P_1 = 0,18$, $P_2 = 0,82$, $\delta(x - x_1)$ – дельта функция в точке $x_1 = 0,8 \cdot 10^{-6}$, соответствующей первому пику; $\delta(x - x_2)$ – дельта функция в точке $x_2 = 1,15 \cdot 10^{-5}$, соответствующей второму пику, подставив в выражение (3.7) значения вероятностей, получим:

$$f(x) = 0,18 \cdot \delta(x - x_1) + 0,82 \cdot \delta(x - x_2).$$

В обоих случаях (рис. 3.9 и 3.11) интервалы времени обслуживания имеют гистограммы с бимодальным распределением, первая и вторая моды которого разнесены в области «коротких» и «длинных» интервалов времени обслуживания соответственно.

3.4 Получение и исследование гистограмм и их аппроксимаций для мультимедийного трафика абонентского оборудования доступа

В настоящем пункте описаны характеристики абонентского оборудования доступа при обслуживании мультимедийного трафика.

Полную картину о СМО, представленной узлами абонентского оборудования получим исследуя:

- объединенный трафик;
- видеотрафик IPTV;
- трафик Internet,

в соответствии со схемой рис. 2.20 [73].

1. В первой части пункта 3.4 определим функции распределения плотностей вероятностей случайных интервалов времени между пакетами для абонентского оборудования доступа [65]. Гистограммы и распределения плотности вероятностей $f(x)$ интервалов времени между пакетами

объединенного трафика и Internet трафика изображены на рис. 3.12 и рис. 3.13 соответственно. Решение о соответствии гистограмм аппроксимирующей функции принималось по критериям согласия Колмогорова-Смирнова.

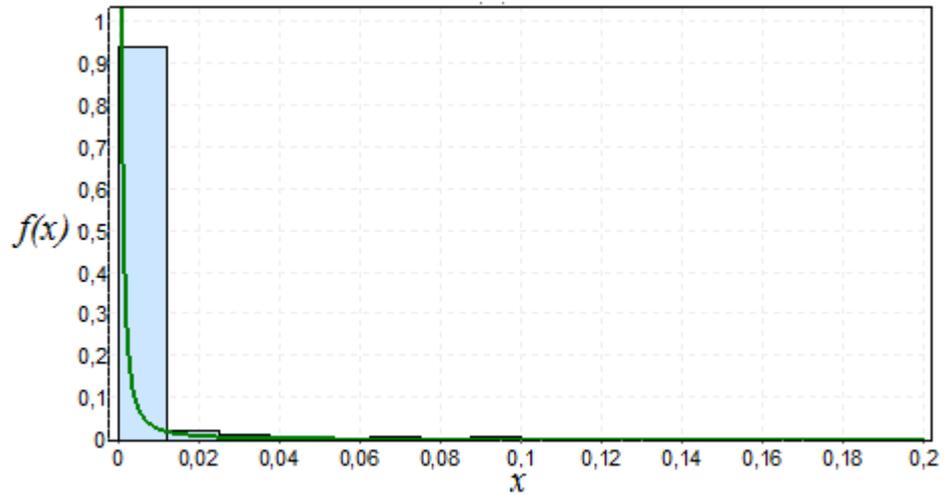


Рис. 3.12. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами объединенного трафика абонентского коммутатора доступа

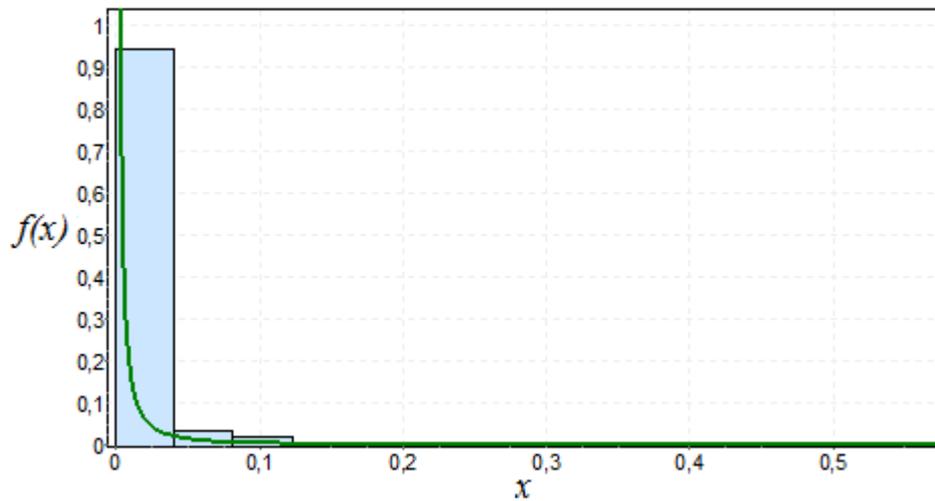


Рис. 3.13. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами трафика Internet абонентского коммутатора доступа

Гистограммы, представленные на рис. 3.12 и рис. 3.13 с большой долей вероятности (0,86 и 0,91 соответственно) аппроксимированы Лог-логистическим распределением (Log-Logistic):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \left(1 + \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \right)^{-2}, \quad (3.8)$$

где α – непрерывный параметр формы ($\alpha > 0$), β – непрерывный масштабный коэффициент ($\beta > 0$), область определения функции: $\gamma \leq x < +\infty$. Параметры Лог-логистического распределения имеют значения:

- объединенный трафик $\alpha = 0,63457$, $\beta = 0,000051$, $\gamma = 0$;
- трафик Internet $\alpha = 0,53689$, $\beta = 0,00012$, $\gamma = 0$.

Тем же способом исследовались интервалы времени между пакетами видеотрафика IPTV. Гистограмма, отражающая картину распределения интервалов времени между пакетами для видеотрафика IPTV, приведена на рис. 3.14. Данная гистограмма аппроксимирована распределением Коши (Cauchy) по критериям согласия Колмогорова-Смирнова с вероятностью совпадения 0,83.

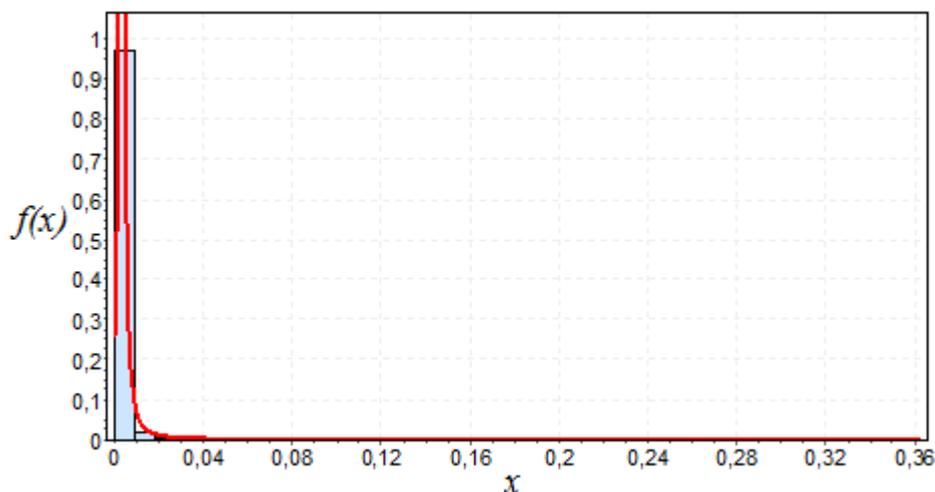


Рис. 3.14. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами видеотрафика IPTV ресивера IPTV

Аналитическая форма записи плотности вероятностей распределения Коши имеет вид:

$$f(x) = \left(\pi \sigma \left(1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right) \right)^{-1}, \quad (3.9)$$

где σ – непрерывный масштабный коэффициент ($\sigma > 0$), μ – непрерывный параметр распределения, значение параметров: $\sigma = 0,00108$, $\mu = 0,00329$. Область определения функции: $-\infty < x < +\infty$. Однако, изображенная гистограмма имеет один выраженный пик, поэтому ее аппроксимацию можно выразить как:

$$f(x) = P \cdot \delta(x - x_0),$$

где $P \approx 1$, $\delta(x - x_0)$ – дельта-функция, соответствующая пику в точке $x_0 = 0,0122$. В работе [29] дополнительно рассмотрен трафик Internet TV, который является симбиозом IPTV и Internet, т.к., обладая всеми признаками телевизионного пакетного трафика, способом его передачи остается – одноадресная рассылка.

2. Аналогичным способом, проанализируем интервалы времени обслуживания трафика оборудования абонентского доступа и дадим к ним некоторые пояснения.

Гистограмма распределения объединенного мультимедийного трафика аппроксимирована с недостаточной достоверностью, т.к. функция, выбранная из библиотеки EasyFit, не охватывает оба пика, представленных на рис. 3.15. Разумно применить к приведенной гистограмме формулу распределения смеси, как в пункте 3.3:

$$f(x) = P_1 \cdot f_1(x) + P_2 \cdot f_2(x), \quad (3.10)$$

Тогда в качестве $f_1(x)$ и $f_2(x)$ удобно взять дельта-функции: $\delta(x - x_1)$ в точке $x_1 = 0,7 \cdot 10^{-5}$ с; $\delta(x - x_2)$ в точке $x_2 = 1,15 \cdot 10^{-4}$ с. Подставим в (3.10) значение вероятностей и запишем простое аппроксимирующее выражение:

$$f(x) = 0,38 \cdot \delta(x - x_1) + 0,63 \cdot \delta(x - x_2).$$

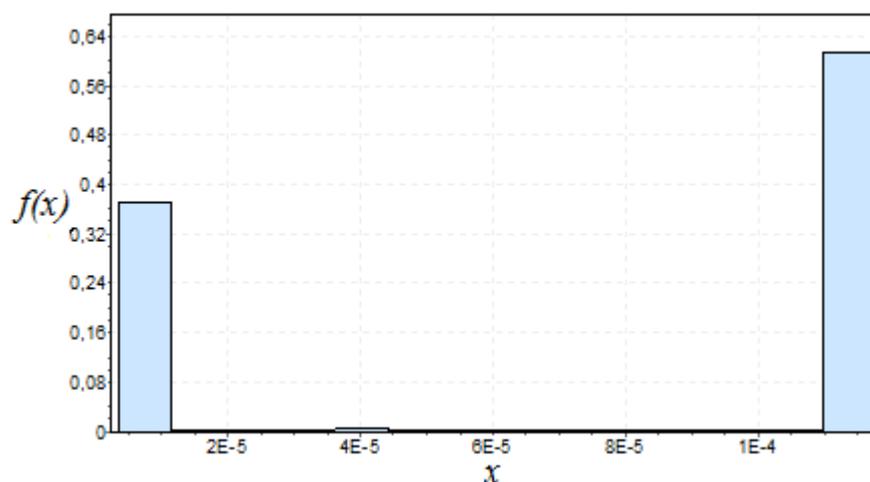


Рис. 3.15. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов объединенного трафика абонентского коммутатора доступа

Гистограмма Internet трафика аппроксимирована Бета распределением (Beta) с вероятностью 0,76:

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha_1, \alpha_2)} \cdot \frac{(x - a)^{\alpha_1 - 1} \cdot (b - x)^{\alpha_2 - 1}}{(b - a)^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}},$$

где α_1, α_2 – непрерывные параметры формы, ($\alpha_1, \alpha_2 > 0$, $\alpha_1 = 0,21662$, $\alpha_2 = 0,2837$), a, b – непрерывные параметры границ ($a > b$, $a = 3,36 \cdot 10^{-6}$, $b = 1,24 \cdot 10^{-4}$), область определения функции: $a < x < b$.

Функция Бета распределения изображена на рис. 3.16.

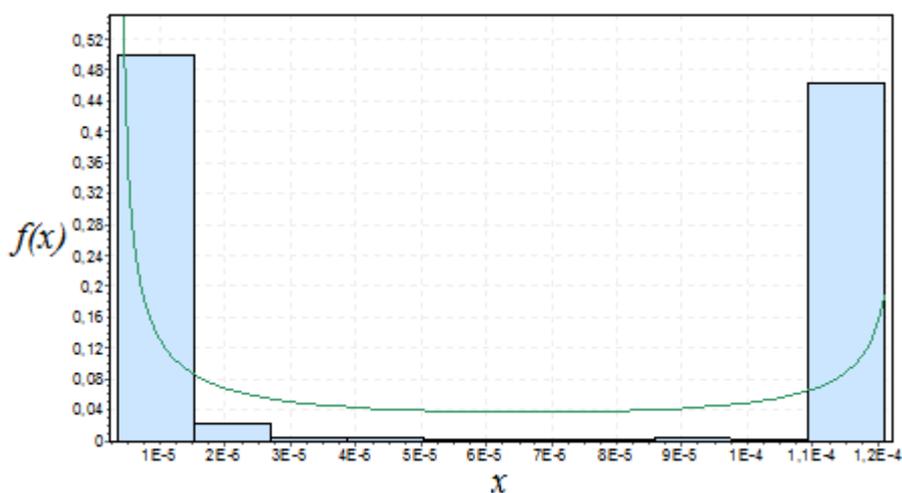


Рис. 3.16. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов Internet трафика абонентского коммутатора доступа

В данном случае точность подбора распределения численно и графически удовлетворяет полученной гистограмме.

Гистограмма видеотрафика IPTV, изображенная на рис. 3.17, аппроксимирована обобщенным экстремальным распределением (Gen. Extreme Value) с вероятностью 0,68. Функция плотности распределения вероятностей имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \cdot \exp(-(1+kz)^{\frac{1}{k}})(1+kz)^{-1-\frac{1}{k}}, & k \neq 0; \\ \frac{1}{\sigma} \cdot \exp(-\exp(-z)), & k = 0, \end{cases}$$

где k – непрерывный параметр формы ($k = -2,8642$), σ – непрерывный масштабный коэффициент ($\sigma > 0$, $\sigma = 6,3149 \cdot 10^{-6}$), μ – непрерывный параметр сдвига ($\mu = 1,0794 \cdot 10^{-4}$), область определения функции: $1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} > 0$.

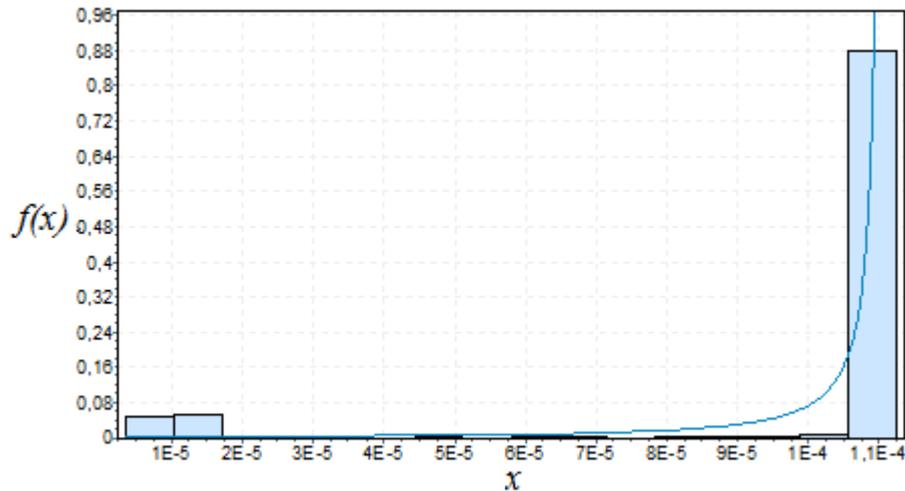


Рис. 3.17. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов видеотрафика IPTV ресивера IPTV

Однако данная аппроксимация не охватывает пик интервалов времени обслуживания $[0,3 \cdot 10^{-5} - 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}]$. Рассуждая аналогично примеру исследования гистограммы (рис. 3.15), выразим плотность вероятностей

времени обслуживания пакетов видеотрафика IPTV в виде распределения смеси:

$$f(x) = P_1 \cdot \varphi_1(x) + P_2 \cdot \varphi_2(x), \quad (3.11)$$

где $\varphi_1(x)$ – функция, учитывающая влияние пакетов с «малыми» длинами, временем обслуживания $[0,3 \cdot 10^{-5} \div 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}]$, а $\varphi_2(x)$ – функция, учитывающая влияние пакетов с «большими» длинами, временем обслуживания $[1,05 \cdot 10^{-4} \div 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ с}]$.

Наиболее точно $\varphi_1(x)$ аппроксимируется распределением Дагума (3.4). Значения основных параметров: $k = 7,4179$, $\alpha = 2,3508$, $\beta = 3,3064 \cdot 10^{-6}$, $\gamma = 0$, распределение функции $\varphi_1(x)$ приведен на рис. 3.18.

В качестве $\varphi_2(x)$ следует взять дельта-функцию, которая значительно упростит запись аналитической формы выражения:

$$\varphi_2(x) = \delta(x - x_2),$$

где $x_2 = 1,1 \cdot 10^{-4}$. Соответственно, для P_1 и P_2 выбираются значения $P_1 = 0,12$, $P_2 = 0,88$.

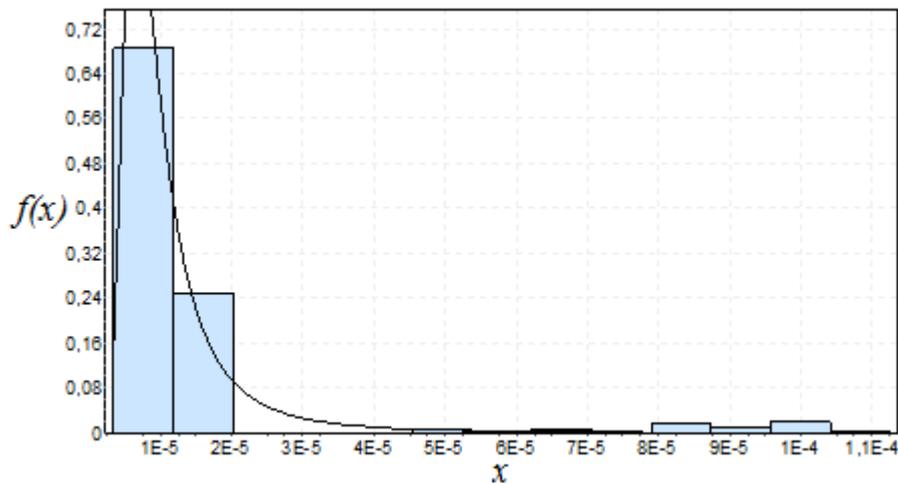


Рис. 3.18. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов «малой» длины видеотрафика IPTV ресивера IPTV

В заключении обобщим результаты, полученные в п. 3.3 и 3.4. Значения интервалов времени между пакетами $t_{cp,d}$ для оборудования доступа

распределены вдоль оси x в виде равномерно-затухающих функций, значимая часть которых сосредоточена в пределах значений:

- объединенный трафик 0,0001 - 0,0016 с;
- видеотрафик IPTV 0,0001 - 0,0020 с.

Для трафика абонентского оборудования характерно сосредоточение более 90% значений интервалов времени $\tau_{cp.a}$ в одной моде:

- объединенный трафик 0,0001 - 0,0150 с;
- трафик Internet 0,0001 - 0,0400 с;
- видеотрафик IPTV 0,0001 - 0,0350 с.

Известно, что скорость передачи трафика на уровне доступа 1000 Мбит/с., а скорость абонентского уровня – 100 Мбит/с. Нетрудно заметить, что отношение $\frac{\tau_{cp.d}}{\tau_{cp.a}} \approx 10$, таким образом, налицо связь между

скоростью передачи и длительностью интервалов времени между пакетами.

Длительность времени обслуживания, во всех перечисленных случаях имеет бимодальную гистограмму распределения. Не акцентируя внимание на

значениях, скажем, что здесь тоже работает соотношение $\frac{\xi_{cp.d}}{\xi_{cp.a}} \approx 10$.

Замечание 1. Полученные в главе аналитические выражения и графические изображения аппроксимаций в целях решения аналитических задач, можно заменить другими, удовлетворяющими исходным гистограммам по принятым критериям согласия.

Замечание 2. В некоторых случаях для упрощения в качестве функции аппроксимации была использована дельта-функция, но для целей аналитического исследования узлов МСС как СМО возможен выбор других, более сложных аппроксимирующих выражений или их комбинаций.

3.5 Выводы по главе

Третья глава посвящена анализу распределений мультимедийного трафика инфокоммуникационной МСС на абонентском уровне и уровне доступа.

Во втором пункте проанализированы распределения интенсивности трафика одноадресной и многоадресной передачи, зарегистрированные на входе оборудования доступа и проведены отдельные исследования трафиковых интенсивностей при одноадресной и многоадресной передаче:

1. Определена плотность вероятности распределения трафика одноадресной передачи.
2. Определена плотность вероятности распределения трафика многоадресной передачи.

Основной целью отдельного анализа интенсивности трафика режимов одноадресной и многоадресной передачи является: выявление статистических особенностей каждого случайного ряда в отдельности и обеспечение надлежащего качества обслуживания каждого вида приоритетного трафика (VoD, запросы на переключение каналов, видеотрафик IPTV, пользовательский трафик), связанного с передачей телевизионного контента по IP-сетям.

В третьем и четвертом пункте проанализированы распределения интервалов времени между пакетами и времени обслуживания пакетов и поэтапно проведены исследования трафика разных уровней пакетной сети.

1. Для уровня доступа определены выражения плотностей вероятностей для распределений интервалов времени между поступлениями пакетов на обслуживание и интервалов времени обслуживания пакетов в системе:

- объединенного мультимедийного трафика;
- видеотрафика IPTV.

2. Для абонентского оборудования доступа определены выражения плотностей вероятностей для распределений интервалов времени между

поступлениями пакетов на обслуживание и интервалов времени обслуживания пакетов:

- объединенный трафик;
- видеотрафик IPTV;
- трафик Internet.

Следует отметить, что исследование вероятностных свойств мультимедийного трафика, в частности видеотрафика IPTV, показывает целесообразность использования бимодальных моделей для плотности вероятностей интервалов времени обслуживания пакетов.

Плотности вероятностей интервалов времени между пакетами мультимедийного трафика также имеют законы распределения отличные от экспоненциального, в таком случае адекватной моделью системы массового обслуживания при проведении расчетов вероятностно-временных характеристик МСС с использованием методов ТМО может служить только модель $G/G/1$.

4 РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ МЕТОДАМИ ТМО

4.1 Аналитические методы исследования телекоммуникационного трафика МСС

Непуассоновский характер распределения случайных величин не позволяет применить классический подход к анализу узлов МСС как систем массового обслуживания типа $M/M/1$ и $M/M/n$ [35, 36]. При этом комплекс статистических исследований, проведенных во второй главе, дает неоднозначную характеристику степени самоподобия мультимедийного трафика. Сравнение результатов корреляционного анализа, выполненного на основе расчетов коэффициентов корреляции по экспериментальной выборке и теоретических коэффициентов корреляции, рассчитанных по формуле (2.2) дает основание в первом приближении считать зарегистрированные последовательности интервалов времени независимыми случайными величинами. Тогда при расчетах узлы обработки мультимедийного трафика можно описывать моделями ТМО типа $G/G/1$ или $G/G/n$ [30, 31, 43, 86].

Для описания случайной функции плотности вероятностей параметров входящего трафика узла инфокоммуникационной МСС возможно использовать методы аппроксимации и интерполирования [8, 18, 58, 59, 87].

Функции плотностей вероятностей интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания пакетов, полученные в третьей главе и входящие в математическую модель $G/G/1$ рассматриваемого процесса, весьма проблематично использовать в расчетах вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных узлов методами ТМО. В таком случае есть возможность произвести замену полученной аналитической функции на другую функцию, удовлетворяющую алгоритмам ТМО, с допустимой погрешностью.

4.1.1 Аппроксимация функции плотности вероятностей суммой затухающих экспонент

Одним из методов расчета вероятностно-временных характеристик СМО с моделями обслуживания трафика типа $G/G/1$ и $G/G/n$ является решение ИУ Линдли [35, 36, 39]. Решение ИУ Линдли реализуется различными способами, один из них – спектральный метод [36].

В качестве исходных данных при спектральном решении ИУ Линдли желательно иметь функции распределения интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания [36], аппроксимированные суммой затухающих экспонент [88, 89].

Для преобразования исходной функции плотности вероятностей необходимо применить алгоритм аппроксимации случайной функции суммой затухающих экспонент [88, 89]. Обратим внимание на то, что математический аппарат данного алгоритма целесообразно реализовывать с помощью ПК и пакета математического ПО.

Возьмем функцию плотности вероятностей случайной величины $f(x)$, заданную на промежутке $[a, b]$, для которой необходимо построить ее аппроксимацию вида:

$$f(x) = \sum_{k=1}^n a_k e^{-\alpha_k x} + R(x), \quad \alpha_k > 0 \quad (4.1)$$

и оценить погрешность $R(x)$.

На начальном этапе, в целях упрощения решения необходимо перейти к вспомогательной функции $g(y) = f(-m \ln y)$, таким образом, осуществляется переход от нелинейного (экспоненциального) уравнения к линейному уравнению. Возьмем $a_k = \frac{k}{m}$, и введем обозначение $y = e^{\frac{x}{m}}$. После того, как положительная константа m зафиксирована (значение параметра m для всех функции $f(x)$ определяется в каждом случае экспериментальным путем),

необходимо заменить переменной $x = -m \ln y$. В работах [88, 89] показано, что достаточное количество узлов интерполирования $n = 5$.

Заметим, что для определения узлов интерполирования y_k вспомогательной функции реальных распределений трафика инфокоммуникационных мультисервисных сетей необходимо применять формулу нулей полиномов Чебышева:

$$y_k = \frac{b+c}{2} + \frac{b-c}{2} \cdot \cos \frac{\pi \cdot (2k-1)}{2n}, \quad (4.2)$$

где c, b значения границ отрезка $[c, b]$, на котором выполняется интерполирование функции $g(y)$ [28].

Вычислить неизвестные коэффициенты во вспомогательной функции $g(y) = \sum_{k=1}^n a_k y^k + \tilde{R}(y)$ можно решая СЛАУ относительно неизвестных a_k с применением метода обратной матрицы [14], который наиболее просто и быстро реализуем математическими ПО.

Добавим, что при получении аппроксимации функций плотности вероятностей случайных распределений суммой экспонент с показателями, образующими арифметическую прогрессию, нужно соблюсти условие вещественности и отрицательности этих показателей при положительных аргументах.

4.2 Аппроксимация распределения плотности вероятности мультимедийного трафика узла МСС

Рассмотрим случай обслуживания реального мультимедийного трафика в СМО представленной узлом МСС. Для начала введем следующие обозначения плотностей вероятностей, аппроксимированных суммой экспонент. Обозначим функцию плотности вероятностей интервалов времени между поступлениями пакетов как $a(\tau)$, а функцию плотности вероятностей интервалов времени

обслуживания пакетов (длин пакетов) как $b(\xi)$, в соответствии с обозначениями принятыми в [36].

Используем следующие аппроксимирующие выражения плотностей вероятностей интервалов времени между пакетами $a(\tau)$ и времени обслуживания $b(\xi)$ [88]:

$$a(\tau) = \sum_{k=1}^n a_k e^{-\alpha_k \tau}, \quad (4.3)$$

$$b(\xi) = \sum_{k=1}^l b_k e^{-\beta_k \xi}. \quad (4.4)$$

где $k = 1, \dots, n$, $n = 5$ и $k = 1, \dots, l$, $l = 5$ соответственно.

Пример

Аппроксимируем плотности вероятностей интервалов времени между поступлениями пакетов и времени обслуживания видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа. Гистограммы плотностей вероятности видеотрафика IPTV на входе ресивера IPTV, приведены на рис. 3.14, 3.17, 3.18.

Гистограмма плотности вероятностей интервалов времени между пакетами (рис. 3.14) аппроксимирована распределением Коши (3.8), длина выборки интервалов времени между пакетами τ_i , где i – моменты поступления пакетов, $i = 1, 2, \dots, 100000$.

Решая задачу аппроксимации распределения Коши при заданных параметрах суммой затухающих экспонент аналогично тому, как это сделано в [88, 89], получаем выражение (4.3) в виде:

$$a(\tau) = a_1 e^{-\alpha_1 \tau} + a_2 e^{-\alpha_2 \tau} + a_3 e^{-\alpha_3 \tau} + a_4 e^{-\alpha_4 \tau} + a_5 e^{-\alpha_5 \tau}, \quad (4.5)$$

с коэффициентами: $n = 5$, $a_1 = 0,5240$, $a_2 = -3,3552$, $a_3 = 22,2058$,

$a_4 = -58,6077$, $a_5 = 65,4504$, $\alpha_k = \frac{k}{m}$, $m = 0,044$.

Полученная в результате аппроксимации, функция плотности вероятностей интервалов времени между пакетами видеотрафика IPTV $a(\tau)$ представлена на рис. 4.1.

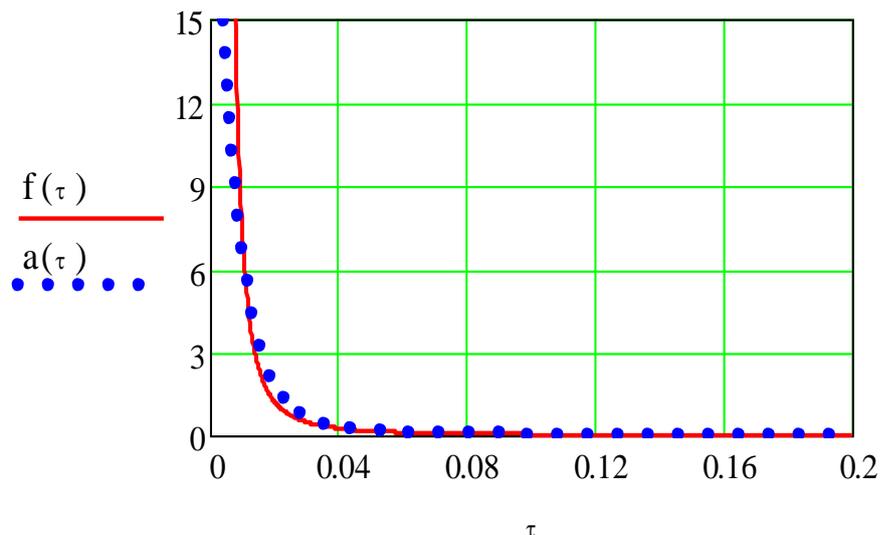


Рис. 4.1. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами видеотрафика IPTV на входе ресивера IPTV (линия – исходная, точки – сумма экспонент)

График абсолютной погрешности вычисления $R(\tau)$ для функции плотности вероятностей $a(\tau)$ приведен на рис. 4.2.

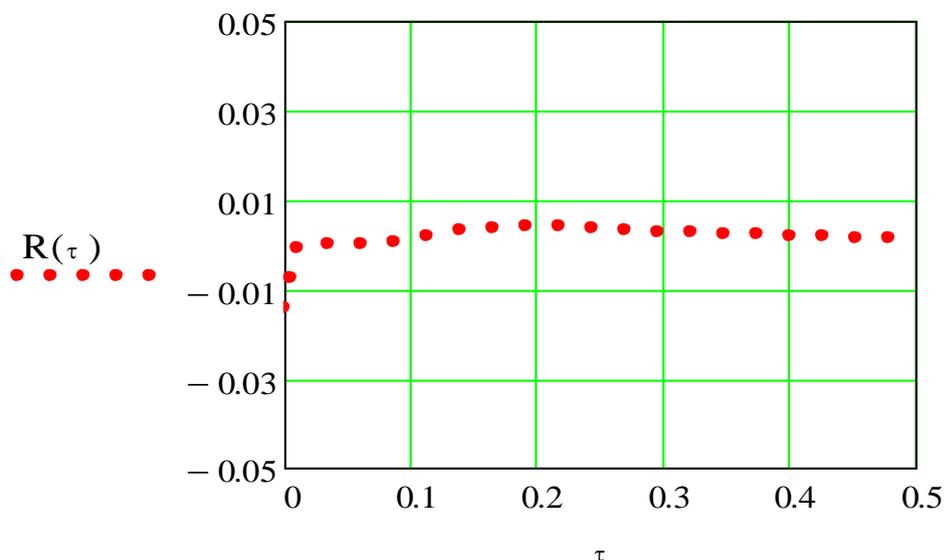


Рис. 4.2. График абсолютной погрешности $R(\tau)$

Расчет показывает, что аппроксимация функции плотности вероятностей имеет максимальное значение погрешности $R(\tau) = 0,01$ (рис. 4.5).

Далее аппроксимируем плотность вероятностей интервалов времени обслуживания пакетов видеотрафика IPTV на входе ресивера IPTV ξ_j ,

где j - моменты поступления пакетов на обслуживание, $j = 1, 2, \dots, 10000$. На рис. 3.17 изображена гистограмма, выраженная суммой двух функций (3.11), в которой второй пик для простоты обозначен дельта-функцией. Остается аппроксимировать суммой затухающих экспонент первое слагаемое распределения смеси (3.11).

Аппроксимируя распределение Дагума (3.4), представленное на рис. 3.18, суммой затухающих экспонент, из (4.4) получаем выражение:

$$b(\xi) = b_1 e^{-\beta_1 \xi} + b_2 e^{-\beta_2 \xi} + b_3 e^{-\beta_3 \xi} + b_4 e^{-\beta_4 \xi} + b_5 e^{-\beta_5 \xi}. \quad (4.6)$$

с коэффициентами: $l = 5$, $b_1 = 35,179$, $b_2 = -136,257$, $b_3 = 305,545$, $b_4 = -270,161$,

$$b_5 = 109,389, \quad \beta_k = \frac{k}{m}, \quad m = 0,32.$$

График аппроксимации суммой затухающих экспонент плотности вероятностей времени обслуживания видеотрафика IPTV $b(\xi)$ представлен на рис. 4.3:

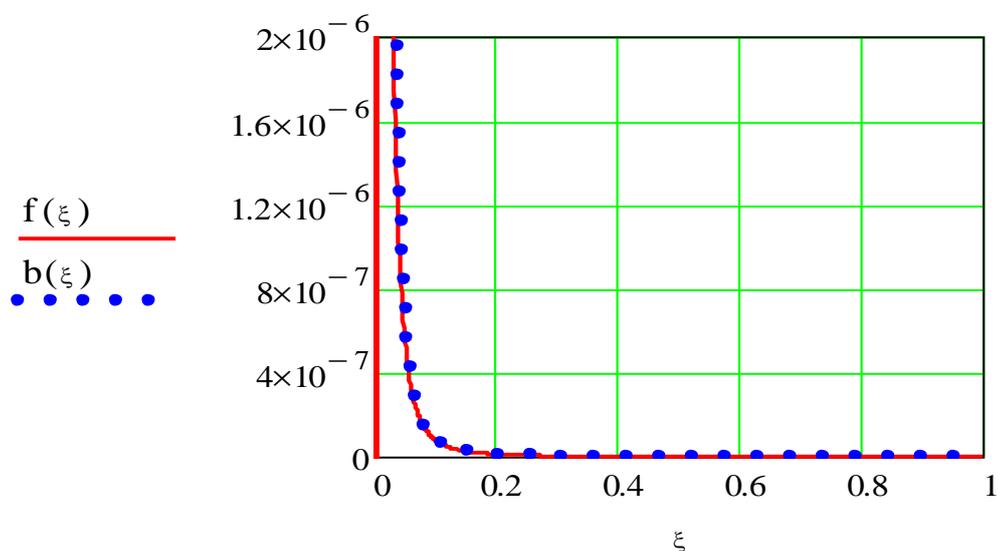


Рис. 4.3. Плотность вероятностей времени обслуживания видеотрафика IPTV на входе ресивера IPTV (линия – исходная, точки – сумма экспонент)

График абсолютной погрешности вычисления $R(\xi)$ функции плотности вероятностей $b(\xi)$ приведен на рис. 4.4.

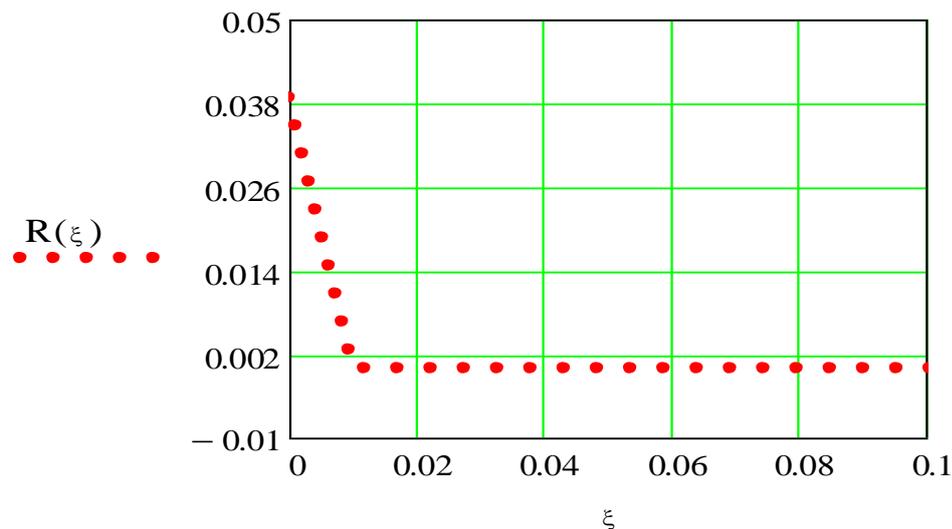


Рис. 4.4. График абсолютной погрешности $R(\xi)$

Максимальное значение абсолютной погрешности аппроксимации функции плотности вероятностей времени обслуживания пакетов суммой затухающих экспонент $R(\xi) = 0,038$ (рис. 4.4).

Таким образом, применение алгоритма аппроксимации случайной функции плотности вероятностей суммой затухающих экспонент, позволяет получить выражения приемлемые для использования в аналитических методах расчета узлов МСС как СМО.

Дальнейшие исследования показывают, что значения погрешности $R(\tau)$ и $R(\xi)$ можно считать удовлетворительными при использовании имеющихся аппроксимаций в спектральном методе решения ИУ Линдли.

4.3 Спектральное решение интегрального уравнения Линдли в общем виде

Мультимедийный трафик на входе телекоммуникационных устройств СПД обладает непуассоновским характером распределения, поэтому расчет параметров узлов коммутации и маршрутизации возможен при выборе в качестве их математической модели – модель $G/G/1$.

Сейчас не разработаны простые методы расчетов узлов СПД с математической моделью типа $G/G/1$ и $G/G/n$ [33]. Однако одним из способов оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных узлов инфокоммуникационной сети, как СМО, в условиях слабовыраженных корреляционных связей является решение ИУ Линдли.

Подробный вывод ИУ Линдли приведен в [35, 36, 39]. Уделим особое внимание финальной формуле, полученной при выводе уравнения:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u)dC(u), & y \geq 0 \\ 0 & , y < 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Метод решения интегрального уравнения Линдли, основанный на спектральном разложении, опирается на уравнение в форме (4.7). Имея свертку в правой части уравнения, его можно было бы решить сразу, однако интеграл в уравнение (4.7) дает значение при неотрицательных значениях y , в таком случае необходимо продлить его на всю вещественную ось, и получить:

$$W_-(y) = \begin{cases} 0 & , y \geq 0 \\ \int_{-\infty}^y W(y-u)dC(y), & y < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Суммируя (4.7) и (4.8), запишем выражение интегральной функции времени ожидания при любых значений аргумента:

$$W(y) + W_-(y) = \int_{-\infty}^y W(y-u)c(u)du, \forall(y), \quad (4.9)$$

где $c(u) = dC(u) / du$ плотность вероятностей.

Функция распределения $W(y)$ является ограниченной при $y \rightarrow \infty$, тогда $\Phi_+(s)$ аналитическая при $\text{Re}(s) > 0$. В соответствии с принятыми в литературе обозначениями введем переменные $A^*(s)$ и $B^*(s)$, являющиеся преобразованиями Лапласа плотностей вероятности интервалов времени между поступлениями пакетов и интервалов времени обслуживания. Преобразования, выполненные в [35] демонстрируют, что $A^*(-s)$ и $\Phi_-(s)$ аналитические в

области $\operatorname{Re}(s) < D$, учитывая вышесказанное получаем следующие соотношения:

$$A^*(s) = \int_{0^-}^{+\infty} a(\tau) e^{-s\tau} d\tau,$$

$$B^*(s) = \int_{0^-}^{+\infty} b(\xi) e^{-s\xi} d\xi.$$

Используя данные обозначения и свойство свертки, запишем преобразование Лапласа функции $c(u)$:

$$C^*(s) = A^*(-s)B^*(s). \quad (4.10)$$

Таким образом, из (4.10) получаем:

$$\Phi_+(s) + \Phi_-(s) = \Phi_+(s)A^*(-s)B^*(s),$$

$$\Phi_-(s) = \Phi_+(s)(A^*(-s)B^*(s) - 1). \quad (4.11)$$

Функции $\Phi_+(s)$ и $B^*(s)$ аналитические в области $\operatorname{Re}(s) > 0$, и представляют собой преобразования функций положительных аргументов.

Далее попытаемся аппроксимировать каждое из преобразований Лапласа $A^*(s), B^*(s)$ с помощью дробно-рациональных функций. Тогда выражение $A^*(-s)B^*(s) - 1$ будет дробно-рациональной функцией, и для нее можно выполнить спектральное разложение:

$$A^*(-s)B^*(s) - 1 = \frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}. \quad (4.12)$$

Разумеется, что $\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)}$ будет рациональной функцией зависящей от s .

В таком случае необходимо определить разложение при условии (4.13):

– функция $\psi_+(s)$ является аналитической без нулей в полуплоскости

$$\operatorname{Re}(s) > 0, \quad \lim_{|s| \rightarrow \infty} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1.$$

– функция $\psi_-(s)$ является аналитической без нулей в полуплоскости $\text{Re}(s) < D$, $\lim_{|s| \rightarrow \infty} \frac{\psi_-(s)}{s} = -1$.

Проблема, возникающая при решении интегрального уравнения описанным способом связана с нахождением функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$, удовлетворяющих условиям (4.13). Опуская промежуточные выкладки, получаем:

$$\Phi_-(s)\psi_-(s) = \Phi_+(s)\psi_+(s) = K, \quad (4.14)$$

где K – константа. Отсюда получаем выражение для вычисления $\Phi_+(s)$:

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)}. \quad (4.15)$$

Проведенные выкладки были необходимы для вычисления преобразования Лапласа функции распределения времени $\Phi_+(s)$ в виде (4.15).

Остается вычислить постоянную K . Вспомним, что $s\Phi_+(s) = W^*(s)$, тогда:

$$s\Phi_+(s) = W^*(s) = \int_{0^-}^{+\infty} e^{-sy} dW(y).$$

Запишем предел выражения при $s \rightarrow 0$. Проведя выкладки в правой части запишем:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \int_{0^-}^{+\infty} e^{-sy} dW(y) = \int_{0^-}^{+\infty} dW(y) = 1.$$

Таким образом, устанавливаем, что

$$\lim_{s \rightarrow 0} s\Phi_+(s) = 1. \quad (4.16)$$

Объединяя выражения (4.14) и (4.15) получаем:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s\Phi_+(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sK}{\psi_+(s)} = 1,$$

Тогда определим следующее выражение вычисления постоянной K :

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s}. \quad (4.17)$$

Выражение (4.17) дает значение K для подстановки в (4.15). Если разложение (4.12) существует, можно определить преобразование Лапласа для функции распределения времени из выражения (4.15), где K определяется из равенства (4.17). Таким образом, для полного решения задачи необходимо найти обратное преобразование Лапласа функции $W^*(s)$ и проинтегрировать полученное выражение.

4.4 Спектральное решение интегрального уравнения Линдли для СМО типа G/G/1 при бимодальном распределении интервалов времени обслуживания

Для корректного решения ИУ Линдли применительно к узлам обработки реального мультимедийного трафика необходимо учесть некоторые особенности распределения интервалов времени обслуживания. Очевидно, что длины пакетов трафика конечны, хотя согласно [114] длина пакета может превышать 65000 байт. На практике редко встречаются пакеты с длиной более 1500 байт, поэтому в случае видеотрафика IPTV, зафиксированного на входе ресивера IPTV, среднюю длину «большого» пакета можно считать равной 1350 байт и, следовательно, время обслуживания «большого» пакета считать конечным. В [13, 73] показано, что распределение времени обслуживания имеет бимодальный характер, одна из мод которого приходится на среднее значение времени обслуживания «большого» пакета. С учетом сказанного **метод решения ИУ** можно представить в следующем виде [70, 72].

1. Осуществить преобразование Лапласа функции $a(\tau)$, используя

$$\text{интеграл } F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt.$$

Примечание. Область определения приведенного интеграла бесконечна, поэтому необходимо ограничение области определения интеграла, при преобразовании Лапласа функции $b(\xi)$.

2. Использовать для записи бимодального распределения времени обслуживания форму распределения смеси:

$$b(\xi) = P_1 \cdot b_1(\xi) + P_2 \cdot b_2(\xi), \quad (4.18)$$

где $b_1(\xi)$ – описывает распределение времени обслуживания пакетов «малой» длины, $b_2(\xi)$ – распределение времени обслуживания пакетов «большой» длины, P_1 и P_2 – вероятности использования распределений $b_1(\xi)$ и $b_2(\xi)$. Подставляя в (4.18) вместо $b_1(\xi)$ выражение (4.4) и вместо $b_2(\xi)$ дельта-функцию получим:

$$b(\xi) = P_1 \cdot \sum_{k=1}^l b_k e^{-\beta_k \xi} + P_2 \cdot \delta(\xi - \xi_2). \quad (4.19)$$

3. Определить преобразование Лапласа [119] для функций $a(\tau)$:

$$A^*(s) = \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{s + \alpha_k}, \quad (4.20)$$

$b(\xi)$ выраженной в форме (4.19):

$$B^*(s) = P_1 \cdot \sum_{k=1}^l \frac{b_k}{s + \beta_k} + P_2 \cdot e^{-s\xi_2}. \quad (4.21)$$

Для вычисления преобразования Лапласа можно воспользоваться фильтрующим свойством дельта-функции.

Примечание. При исследовании бимодальных распределений плотностей вероятностей второй пик $b_2(\xi)$ также можно было бы аппроксимировать суммой затухающих экспонент, что привело бы к необходимости существенного увеличения числа членов ряда в выражении (4.4) и повлекло за собой серьезное усложнение последующих вычислений

4. Записать спектральное разложение $A^*(-s)B^*(s) - 1$, необходимое для решения ИУ Линдли спектральным методом в новой форме, соответствующей бимодальному распределению реального мультимедийного трафика. Воспользоваться приведенными выражениями (4.20), (4.21) и получить:

$$A^*(-s)B^*(s) - 1 = \left[\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{\alpha_k - s} \right] \cdot \left[P_1 \cdot \sum_{k=1}^l \frac{b_k}{s + \beta_k} + P_2 \cdot e^{-s\xi_2} \right] - 1. \quad (4.22)$$

Следуя классическому методу расчета описанному в работе [35], и изменениям внесенным в данном пункте, рассмотрим некоторые примеры.

4.4.1 Спектральное решение интегрального уравнения Линдли для входного трафика СМО типа $G/G/1$ (ресивера IPTV)

Пример № 1

Вычислим интегральное уравнения Линдли спектральным методом для СМО представленной ресивером IPTV. Ресивер IPTV является конечным устройством инфокоммуникационной МСС согласно схеме на рис. 2.20, тогда как остальные узловые элементы сети пропускают трафик транзитом, анализируя лишь заголовки.

В качестве исходных данных воспользуемся результатами аппроксимации пункта 4.2. Здесь $a(\tau)$ – плотность вероятности с распределением Коши (4.5), а $b(\xi)$ – плотность вероятности с распределением смеси: $b_1(\xi)$ – распределение Дагума (4.6), $b_2(\xi)$ – дельта-функция в точке $\xi_2 = 0,0001$ с:

$$b_2(\xi) = \delta(\xi - \xi_2). \quad (4.23)$$

Подставив в (4.18) выражения (4.6) и (4.23) получим запись $b(\xi)$ в общем виде:

$$b(\xi) = P_1 \cdot (b_1 e^{-\beta_1 \xi} + b_2 e^{-\beta_2 \xi} + b_3 e^{-\beta_3 \xi} + b_4 e^{-\beta_4 \xi} + b_5 e^{-\beta_5 \xi}) + P_2 \cdot (\delta \cdot (\xi - \xi_2)), \quad (4.24)$$

где $P_1 = 0,12$ и $P_2 = 0,88$. При выбранных распределениях и их параметрах

коэффициент загрузки $\rho = \frac{\xi_{cp.IPTV}}{\tau_{cp.IPTV}}$ определяется значением $\rho = 0,021$.

Запишем развернутое преобразование Лапласа выражения (4.22) при количестве узлов интерполирования $n = 1..k$, $k = 5$:

$$A^*(-s)B^*(s) - 1 = \left[\frac{a_1}{\alpha_1 - s} + \frac{a_2}{\alpha_2 - s} + \dots + \frac{a_5}{\alpha_5 - s} \right] \cdot \left[P_1 \cdot \left[\frac{b_1}{s + \beta_1} + \frac{b_2}{s + \beta_2} + \dots + \frac{b_5}{s + \beta_5} \right] + P_2 \cdot e^{-s\xi_2} \right] - 1. \quad (4.25)$$

Вспомним спектральное разложение и найдем нули и полюса функций $\psi_-(s)$ и $\psi_+(s)$, которые будут удовлетворять условию (4.13). Вычисляя уравнения относительно s , получаем нули и полюса функции $\psi_-(s)$ и $\psi_+(s)$.

Решение ИУ Линдли будем проводить относительно функции $\psi_+(s)$. В результате получаем следующее соотношение в общем виде:

$$\psi_+(s) = \frac{s \cdot (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5)}{(s - s_6) \cdot (s - s_7) \cdot (s - s_8) \cdot (s - s_9) \cdot (s - s_{10})},$$

где значения корней s : $s_1 = s_7 = -4348$,
 $s_2 = s_6 = -2174$, $s_3 = s_8 = -6522$, $s_4 = 8697$, $s_5 = s_{10} = -10870$, $s_6 = -2174$,
 $s_9 = -8696$.

Применим равенство (4.17) для вычисления постоянной K :

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = \frac{(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5)}{(s - s_6) \cdot (s - s_7) \cdot (s - s_8) \cdot (s - s_9) \cdot (s - s_{10})},$$

получаем $K = 1$. Из выражения (4.15) определим $\Phi_+(s)$:

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{K \cdot (s - s_6) \cdot (s - s_7) \cdot (s - s_8) \cdot (s - s_9) \cdot (s - s_{10})}{s \cdot (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5)}.$$

При введенных обозначениях преобразование Лапласа плотности вероятностей времени ожидания пакета в очереди для системы $G/G/1$ имеет вид:

$$W^*(s) = s\Phi_+(s).$$

Тогда запишем развернутое выражение для определения $W^*(s)$ в общем виде:

$$W^*(s) = \frac{K \cdot (s - s_6) \cdot (s - s_7) \cdot (s - s_8) \cdot (s - s_9) \cdot (s - s_{10})}{(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot (s - s_4) \cdot (s - s_5)}.$$

Вычисляя обратное преобразование Лапласа функции $W^*(s)$, и интегрируя полученную плотность вероятностей, определим интегральную функцию распределения времени ожидания $W(y)$:

$$W(y) = 1 + \frac{e^{-z_1 \cdot y}}{z_1},$$

где $z_1 = 8697$. Вероятность того, что поступающее требование застанет систему свободной $W(0) = 1$. График функции распределения времени ожидания видеотрафика IPTV на входе ресивера IPTV представлен на рис. 4.5.

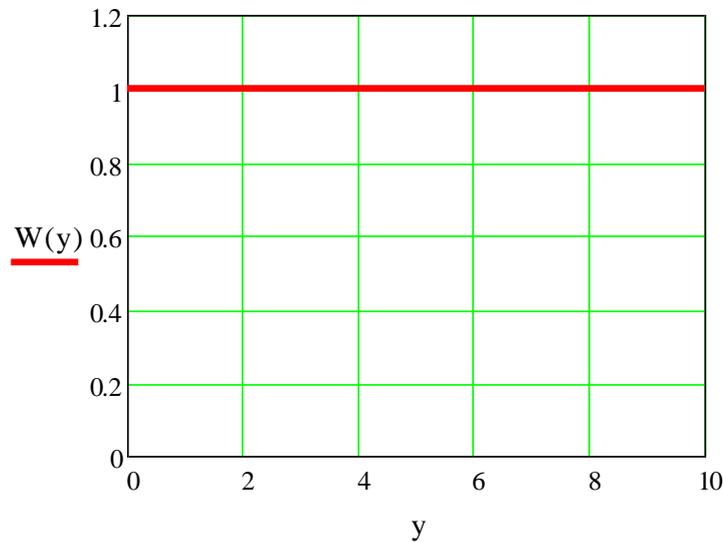


Рис. 4.5. Интегральная функция распределения времени ожидания $W(y)$

Имея функцию $W^*(s)$, определим среднее время ожидания пакета в очереди по знакомому свойству характеристической функции:

$$T = \left. \frac{dW^*(s)}{ds} \right|_{s=0} \quad (4.26)$$

По формуле (4.26) определяем значение среднего времени ожидания пакета в очереди $T = 1,322 \cdot 10^{-8}$ (условных единиц времени). Напомним, что данные результаты характеризуют систему $G/G/1$ при бимодальном распределении времени обслуживания с ограниченной областью определения функции $b(\xi)$.

Пример № 2

Рассмотрим ситуацию обслуживания видеотрафика IPTV низкоскоростным устройством сети передачи данных. В таком случае среднее время обработки пакета соизмеримо со средним значением интервалов времени между пакетами на входе системы, коэффициент использования системы $\rho = 0,86$. В этом примере второй пик также будем аппроксимировать дельта-функцией, в точке $\xi_2 = 0,0045$.

В качестве аппроксимирующего выражения плотности вероятностей интервалов времени между пакетами видеотрафика IPTV $a(\tau)$ воспользуемся выражением (4.6) с параметрами из *примера №1*, плотности вероятностей времени обслуживания пакетов $b(\xi)$ имеет распределение смеси (4.18), где $P_1 = 0,12$, $P_2 = 0,88$.

Гистограмма времени обслуживания первого пика пакетов $b_1(\xi)$, изображенная на рис. 4.6, наиболее точно аппроксимирована обобщенным распределением Парето. Плотность вероятностей обобщенного распределения Парето определяется выражением (3.6), где значения основных параметров $k = 0,56357$, $\sigma = 1,7029 \cdot 10^{-4}$, $\mu = 1,8848 \cdot 10^{-4}$.

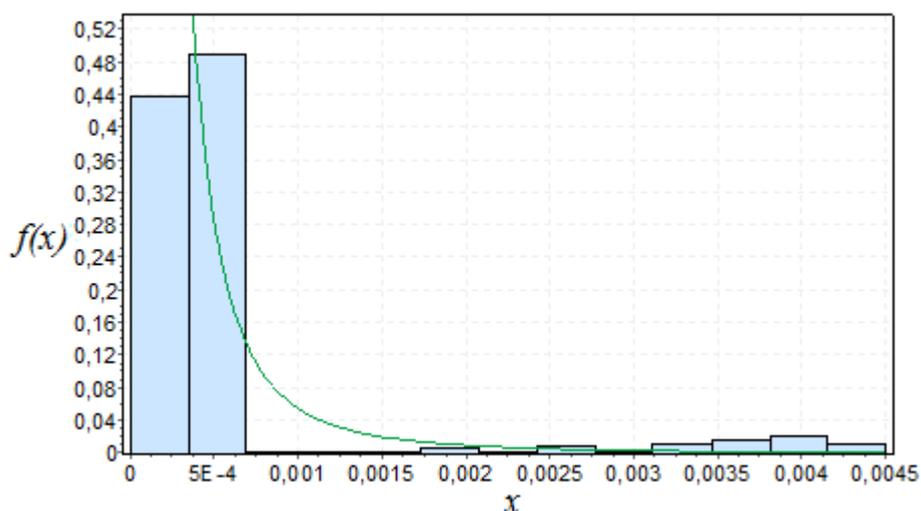


Рис. 4.6. Плотность вероятностей времени обслуживания пакетов «малой» длины видеотрафика IPTV абонентского оборудования доступа

Решая задачу аппроксимации обобщенного распределения Парето суммой затухающих экспонент аналогично тому, как это сделано в [88, 89], можно получаем выражение (4.6) с параметрами: $l = 5$, $b_1 = 146,141$, $b_2 = -1,28 \cdot 10^3$, $b_3 = 9,133 \cdot 10^3$, $b_4 = -2,197 \cdot 10^3$, $b_5 = 2,18 \cdot 10^4$, $\beta_k = \frac{k}{m}$, $m = 0,013$. Графики исходной и аппроксимирующей функций проиллюстрированы на рис. 4.7. График абсолютной погрешности аппроксимации $R(\xi)$ изображен на рис. 4.8.

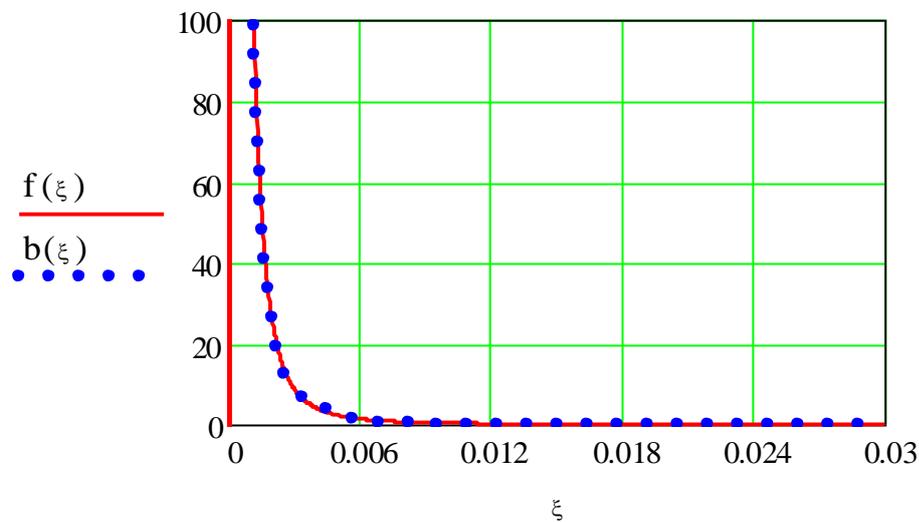


Рис. 4.8 Плотность вероятностей интервалов времени обслуживания видеотрафика IPTV на входе низкоскоростного устройства (линия – исходная, точки – сумма экспонент)

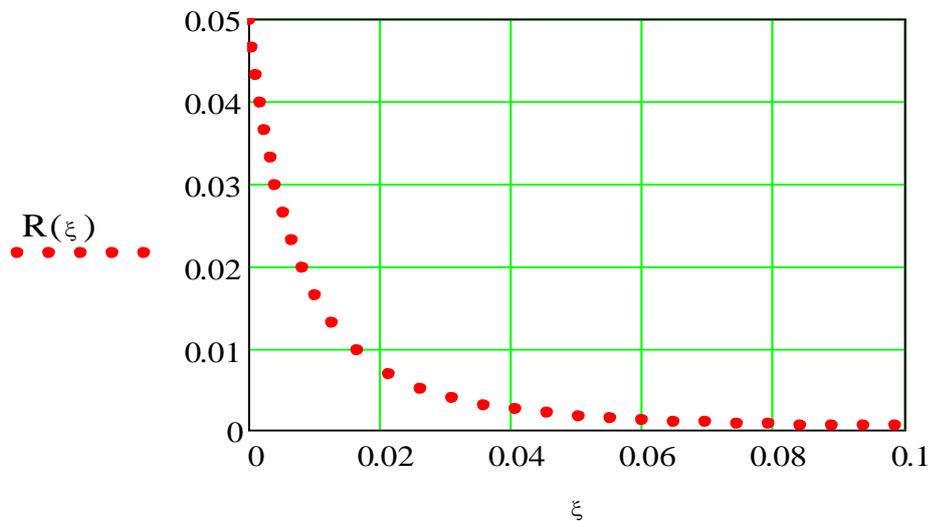


Рис. 4.8 График абсолютной погрешности $R(\xi)$

Повторяя приведенную методику расчета, определим корни s уравнения $\psi_+(s)$ необходимые для решения ИУ Линдли. Значения корней: $s_1 = -829$, $s_2 = -766$, $s_3 = s_7 = -1538$, $s_4 = -986 - 1,61i$, $s_5 = -986 + 1,61i$, $s_6 = -769$, $s_8 = -2308$, $s_9 = -3077$, $s_{10} = -3846$.

Далее по алгоритму определим интегральную функцию распределения времени ожидания $W(y)$:

$$W(y) = 1 + p_1 \cdot \cos(x_1 \cdot y) \cdot e^{-z_1 \cdot y} + p_2 \cdot e^{-z_2 \cdot y} + p_3 \cdot e^{-z_3 \cdot y} + p_4 \cdot \sin(x_4 \cdot y) \cdot e^{-z_4 \cdot y},$$

где $p_1 = 13,0077$, $p_2 = -13,5565$, $p_3 = -0,4088$, $p_4 = 907,2289$, $x_1 = x_4 = 1,61$, $z_1 = z_4 = 986$, $z_2 = 829$, $z_3 = 766$. График функции $W(y)$ проиллюстрирован на рис. 4.9.

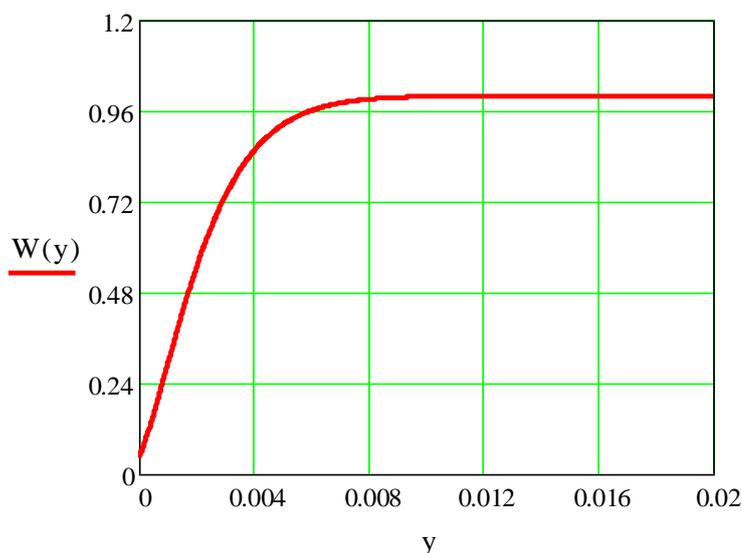


Рис. 4.9. Интегральная функция распределения времени ожидания $W(y)$

Вероятность того, что поступающее требование застанет систему свободной $W(0) = 0,042$. Из (4.26) определяем значение среднего времени ожидания пакета в очереди $T = 2,192 \cdot 10^{-3}$ (условных единиц времени).

Пример № 3

Определим, каким образом изменяться параметры СМО при обслуживании только первого пика пакетов в полученной смеси. Найдем среднее время ожидания пакета в очереди T и вероятность того, что

поступающее требование застанет систему свободной $W(0)$ при обслуживании лишь «малых» пакетов (12%).

Решим уравнение Линдли для системы $G/G/1$, где распределения интервалов времени между пакетами и времени обслуживания являются РТХ.

Для решения уравнения исключим из распределения (4.18) плотность $b_2(\xi)$, и определим корни полученного уравнения $\psi_+(s)$: $s_1 = -2252$, $s_2 = -3748$, $s_3 = -3192$, $s_4 = -1551$, $s_5 = -766$, $s_6 = -3076$, $s_7 = -769$, $s_8 = -1538$, $s_9 = -2307$, $s_{10} = -3846$.

Выполнив все пункты спектрального метода решения ИУ Линдли, получим интегральную функцию распределения времени ожидания $W(y)$:

$$W(y) = 1 + p_1 \cdot \cos(x_1 \cdot y) \cdot e^{-z_1 \cdot y} + p_2 \cdot e^{-z_2 \cdot y} + p_3 \cdot \sin(x_3 \cdot y) \cdot e^{-z_3 \cdot y} + \\ + p_4 \cdot \cos(x_4 \cdot y) \cdot e^{-z_4 \cdot y} + p_5 \cdot \sin(x_5 \cdot y) e^{-z_5 \cdot y},$$

где $p_1 = 0,02355$, $p_2 = -0,03788$, $p_3 = 0,17853$, $p_4 = -0,06524$, $p_5 = 0,57075$, $x_1 = x_3 = 594$, $x_4 = x_4 = 102$, $z_1 = z_3 = 3484$, $z_2 = 739$, $z_4 = z_5 = 1790$.

На рис. 4.10 приведен график $W(y)$ без учета «больших» пакетов. В данном случае вероятность обнаружения системы свободной $W(0) = 0,919$, а среднее время ожидания пакета в очереди $T = 5,55 \cdot 10^{-5}$.

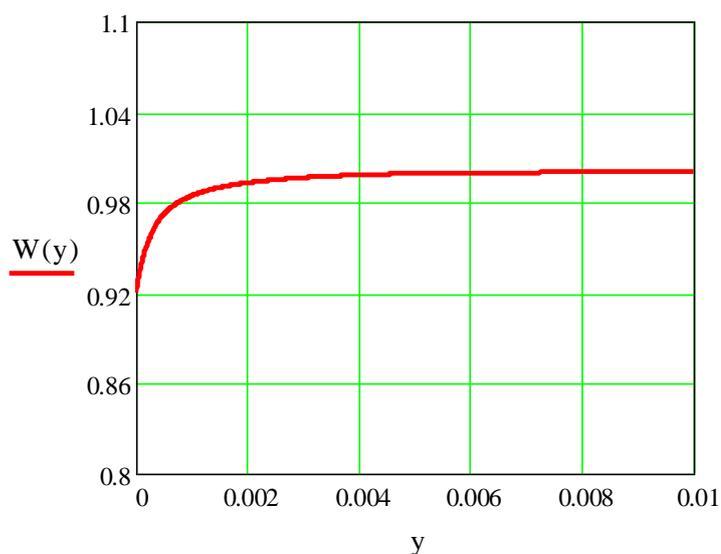


Рис. 4.10 Интегральная функция распределения времени ожидания $W(y)$

Пример № 4

Определим, каким образом влияет преобладание «больших» пакетов в смеси (88%) на среднее время ожидания пакета в очереди T , для этого необходимо исключить из распределения влияние плотности вероятностей времени обслуживания «малых» пакетов трафика.

Для решения данной задачи воспользуемся соотношениями из классической теории массового обслуживания, описанные в [35]. В [35] приводятся основные аналитические результаты для системы $G/G/1$, позволяющие получить некоторые основные характеристики через достаточно простые выражения.

В общем случае для системы $G/G/1$ можно определить верхнюю границу для среднего времени ожидания из выражения:

$$T \leq \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{2 \cdot \tau_{cp.} (1 - \rho)}, \quad (4.27)$$

где σ_a^2 – дисперсия плотности вероятностей интервалов времени между пакетами;

σ_b^2 – дисперсия плотности вероятностей времени обслуживания;

$\tau_{cp.}$ – математическое ожидание плотности вероятностей интервалов времени между пакетами;

ρ – коэффициент загрузки (использования).

Вернемся к СМО, описанной в примере № 2. Так как плотность вероятностей «больших» пакетов представлена дельта-функцией, т.е. пакеты имеют постоянное время обслуживания, то в данном примере уместнее применить модель $G/D/1$.

Так как дельта-функция не имеет дисперсии для модели $G/D/1$ выражение (4.27) можно переписать в следующем виде:

$$T \leq \frac{\sigma_{\tau_{cp.}}^2}{2 \cdot \tau_{cp.} (1 - \rho)}, \quad (4.28)$$

Для распределения Коши (3.9) не существует ни одного момента, в частности дисперсии. Чтобы произвести подстановку значения дисперсии $\sigma_{\tau_{cp}}^2$ в выражение (4.28) необходимо выбрать другой вариант аппроксимации плотности вероятностей интервалов времени между пакетами из библиотеки EasyFit. Следующим по вероятности, после распределения Коши, вариантом аппроксимации гистограммы интервалов времени между пакетами является логнормальное распределение, изображенное на рис. 4.11. Аналитическое выражение плотности вероятностей логнормального распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{(x - \gamma) \cdot \delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\log(x-\gamma)-\mu)^2}{2\delta^2}}, \quad (4.29)$$

где δ, μ - непрерывные параметры, $\delta = 0,70648$, $\mu = -7,8541$, γ - непрерывный параметр сдвига, $\gamma = 0$, область определения функции: $\gamma < x < +\infty$.

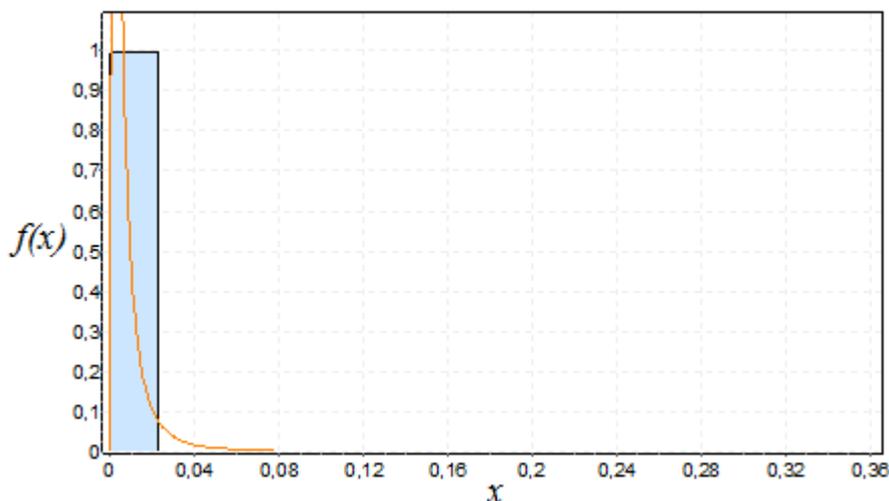


Рис. 4.11. Плотность вероятностей интервалов времени между пакетами видеотрафика IPTV ресивера IPTV

Логнормальное распределение аппроксимирует приведенную гистограмму с точностью 71% по критерию согласия Колмогорова-Смирнова. Для удобства дальнейших аналитических преобразований функцию $f(x)$ в выражении (4.29) обозначим – $a(\tau)$, согласно обозначениям, принятым в [36].

Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение для логнормального распределения определяются выражениями:

$$\tau_{cp.} = e^{\mu + \frac{\delta^2}{2}}, \quad (4.30)$$

$$\sigma_a = e^\mu \cdot \sqrt{e^{\delta^2} (e^{\delta^2} - 1)}. \quad (4.31)$$

Подставляя в выражения (4.30) и (4.31) значения основных параметров логнормального распределения определим верхнюю границу среднего времени ожидания из выражения (4.28) для системы массового обслуживания представленной ресивером IPTV при коэффициенте загрузки $\rho = 0,86$: $T = 0,061$.

Помимо верхней границы среднего времени ожидания возможно определить точное значение среднего времени ожидания требования в системе $G/G/1$, воспользовавшись классическим выражением из [87]:

$$T = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + (\tau_{cp.})^2 \cdot (1 - \rho)^2}{2 \cdot \tau_{cp.} (1 - \rho)} - \frac{I_{cp.}^2}{2 \cdot I_{cp.}}, \quad (4.32)$$

где I_n – продолжительность свободного состояния СМО.

Для вычисления среднего времени ожидания требования T в системе по формуле (4.32) необходимо определить моменты случайной величины I_n . Запишем условие стабильной работы СМО:

$$I_n = \xi_n - \tau_n. \quad (4.33)$$

Для стабильной системы требуется, чтобы математическое ожидание m_I было отрицательным, это условие гарантирует, что поступающее требование застанет систему свободной.

Напомним, что для рассматриваемой системы $G/D/1$ распределение плотности вероятностей времени обслуживания в первом приближении представлено дельта-функцией:

$$b(\xi) = \delta(\xi - \xi_2), \quad (4.34)$$

а распределение плотности вероятностей интервалов времени между пакетами логнормальным распределением (4.29).

Имея распределения плотностей вероятностей интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания системы $G/D/1$, определим плотность вероятностей разности случайных величин $\xi_n - \tau_n$, воспользовавшись выражением:

$$f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} b(\xi) \cdot a(\tau + \xi) d\xi. \quad (4.35)$$

Подставим в выражение (4.35) дельта-функцию вместо плотности вероятностей $b(\xi)$ и произведем некоторые преобразования:

$$f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_2) \cdot a(\tau + \xi) d\xi = a(\tau + \xi_2). \quad (4.36)$$

Имея плотность вероятностей $f(\tau)$, в нашем случае $f(\tau) = f(I)$, определим математическое ожидание и дисперсию случайной величины I_n , используя классические интегральные выражения [15]. Далее из известного соотношения вычисляем второй момент случайной величины I_n :

$$I_{cp}^2 = \sigma_I^2 + m_I^2. \quad (4.37)$$

Перепишем выражение (4.32) с учетом произведенных преобразований для системы $G/D/1$:

$$T = \frac{\sigma_a^2 + (\tau_{cp.})^2 \cdot (1 - \rho)^2}{2 \cdot \tau_{cp.} (1 - \rho)} - \frac{\sigma_I^2 + m_I^2}{2 \cdot m_I}, \quad (4.38)$$

и подставив известные величины, получим среднее время ожидания $T = 0,025$.

Чтобы провести сравнительный анализ параметров, рассчитанных в примерах № 1-4, сведем полученные результаты в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

	Тип СМО	$G/G/1$			$G/D/1$	
	№ Примера	Пример № 1	Пример № 2	Пример № 3	Пример № 4	
	Способ получения результата	Решение ИУ Линдли	Решение ИУ Линдли	Решение ИУ Линдли	Формула (4.28)	Формула (4.38)
Параметр	ρ	0,021	0,86	0,86	0,86	
	$W(0)$	1	0,042	0,919	-	-
	T	$1,322 \cdot 10^{-8}$	$2,192 \cdot 10^{-3}$	$5,555 \cdot 10^{-5}$	0,061	0,025

Таким образом, при обработке трафика с бимодальным распределением времени обслуживания пакетов при загрузке $\rho = 0,86$ вероятность обнаружения системы свободной значительно ниже, чем при обслуживании трафика с преобладающим числом «малых» пакетов. При этом среднее время ожидания в очереди для трафика с бимодальным распределением времени обслуживания увеличивается на несколько порядков в сравнении с обслуживанием «малых» пакетов. Обработка только «больших» пакетов трафика, напротив, влечет за собой увеличение времени ожидания в очереди относительно обслуживания трафика смеси, то есть работает соотношение $T_{G/G/1}(\text{«малые»}) < T_{G/G/1}(\text{«смесь»}) < T_{G/D/1}(\text{«большие»})$.

Высокоскоростная система $G/G/1$ представленная ресивером IPTV с коэффициентом использования $\rho = 0,021$ всегда свободна в моменты поступления новых требований и обладает минимальным временем ожидания пакетов.

4.5 Методика анализа вероятностно-временных характеристик узла пакетной мультисервисной сети связи

Резюмируя результаты выполненной работы, можно получить пошаговую методику оценки статистических и вероятностно-временных характеристик узла (коммутатора, маршрутизатора, ПК, ресивера) пакетной мультисервисной сети связи.

1. Провести регистрацию случайных временных последовательностей трафика на входном порту узла МСС, используя ПО WireShark.

2. Привести результаты регистрации случайных временных последовательностей трафика к виду удобному для дальнейшей обработки (Блокнот.txt, Excel.xls).

3. Рассчитать для исходных временных последовательностей m -агрегированные временные последовательности трафика, где m интервал усреднения.

4. Выполнить оценку полученных случайных последовательностей трафика на наличие и степень самоподобия.

4.1. Рассчитать коэффициенты корреляции $r(k)$ и построить нормированные АКФ исходных трафиковых последовательностей.

4.2. Рассчитать коэффициенты корреляции $r^{(m)}(k)$ и построить нормированные АКФ агрегированных трафиковых последовательностей.

4.3. Оценить параметры Херста исходных и агрегированных трафиковых последовательностей, методом анализа R/S -статистики.

4.4. Для данного значения параметра Херста, H рассчитать теоретическую автокорреляционную функцию самоподобного случайного процесса.

4.5. Сравнить теоретическую автокорреляционную функцию самоподобного случайного процесса с рассчитанной по выборке автокорреляционной функцией для выявления одного из факторов самоподобия.

5. Выполнить построение аппроксимирующих выражений плотностей вероятностей интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания, используя ПО EasyFit.

6. На основании предыдущих пунктов определить тип устройства с точки зрения ТМО ($G/G/1$, $G/D/1$ и др.) и провести расчет вероятностно-временных характеристик устройства.

6.1. Для узлов МСС общего вида $G/G/1$ оценить вероятностно-временные характеристики устройства возможно на основе решения ИУ Линдли, для этого:

- аппроксимировать плотности вероятностей, полученные в пункте 5 суммой затухающих экспонент;
- решить уравнение Линдли спектральным методом (получить интегральную функцию времени ожидания $W(y)$);
- вычислить вероятность нахождения системы в свободном состоянии $W(0)$;
- вычислить среднее время ожидания пакета в очереди T .

6.2. Для узлов типа $G/D/1$ вероятностно-временные характеристики функционирования узла определяются по соответствующим формулам ТМО.

Вывод: Результаты, полученные в вышеперечисленных пунктах позволяют рассчитать некоторые вероятностно-временные характеристики узла обработки непуассоновского трафика мультисервисной сети связи, как системы массового обслуживания типа $G/G/1$ и $G/D/1$:

- вероятность того, что система, обслуживающая трафик, свободна при различных коэффициентах загрузки ρ ;
- среднее время ожидания пакета в очереди для системы $G/G/1$ и $G/D/1$ при различных коэффициентах загрузки.

4.6 Выводы по главе

Четвертая глава посвящена исследованию систем массового обслуживания типа $G/G/1$ на основе реальных вероятностных распределений интервалов времени между пакетами и интервалов времени обслуживания полученных в предыдущей главе.

Для нахождения вероятностно-временных характеристик СМО была предложена методика решения ИУ Линдли спектральным методом, с учетом бимодального характера распределения интервалов времени обслуживания пакетов [70, 72]. Методика расчета показала, что бимодальный характер плотности вероятностей времени обслуживания мультимедийного трафика приводит к заметному увеличению времени ожидания пакетов в очереди в системе $G/G/1$.

Также на основе выражений классической теории массового обслуживания выполнен расчет числовых характеристик для системы $G/D/1$. Методами классической ТМО показано, что при обработке мультимедийного трафика с бимодальным распределением времени обслуживания пакетов системой $G/G/1$, время ожидания пакета в очереди меньше, чем в системе $G/D/1$ с фиксированным временем обработки пакета

С помощью описанных в четвертой главе методов были определены:

- вероятность того, что система $G/G/1$ свободна, при обслуживании мультимедийного трафика с бимодальным распределением интервалов времени обслуживания при разных коэффициентах загрузки ρ ;
- вероятность того, что система $G/G/1$ свободна, при обслуживании мультимедийного трафика с бимодальным и одномодальным распределением интервалов времени обслуживания при одинаковом коэффициенте загрузки ρ ;
- среднее время ожидания пакета в очереди для системы $G/G/1$ при обслуживании мультимедийного трафика с бимодальным распределением интервалов времени обслуживания при разных коэффициентах загрузки ρ ;

– среднее время ожидания пакета в очереди для системы $G/G/1$ при обслуживании мультимедийного трафика с бимодальным и одномодальным распределением интервалов времени обслуживания при одинаковом коэффициенте загрузки ρ ;

– среднее время ожидания пакета в очереди и верхнюю границу ожидания пакета в очереди для системы $G/D/1$ при обслуживании мультимедийного трафика при одинаковом коэффициенте загрузки ρ .

Предложенная методика анализа вероятностно-временных характеристик узла пакетной мультисервисной сети связи дает возможность вычисления параметров конечных узлов инфокоммуникационных МСС, обслуживающих пакетный трафик. Полученные результаты продемонстрировали возможность применения разработанного подхода при решении задач связанных с аналитическим исследованием узлов МСС методами ТМО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертационная работа посвящена анализу инфокоммуникационных мультисервисных сетей, предназначенных для передачи мультимедийной информации по сетям с коммутацией пакетов. Идея работы состоит в использовании в качестве исходных данных последовательностей мультимедийного трафика, полученного в реальных условиях функционирования инфокоммуникационной мультисервисной сети.

В ходе работы были описаны:

- архитектурные особенности современных инфокоммуникационных мультисервисных сетей и перечислены условия необходимые для осуществления передачи мультимедийного контента: Internet трафика и видеотрафика IPTV;

- отличительные особенности сети IPTV в составе инфокоммуникационной мультисервисной сети;

- требования необходимые для транспортировки мультимедийной информации через пакетную транспортную сеть,

и поставлены эксперименты, в ходе которых были получены:

- трассы интенсивностей трафика в режимах одноадресной и многоадресной передачи, зарегистрированные на узле доступа;

- последовательности интервалов времени между поступлением пакетов и интервалов времени обслуживания пакетов мультимедийного трафика, зарегистрированные на узле доступа и абонентском оборудовании доступа.

В ходе теоретических и экспериментальных изысканий, а также аналитических расчетов были выявлены некоторые особенности распределений мультимедийного трафика и вычислены его вероятностно-временные характеристики. Итогом проведенной работы являются следующие основные результаты.

1. Показано, что для адекватного описание реальных самоподобных свойств трафика кроме определения параметра Херста необходимо

исследование корреляционных свойств и распределений временных параметров трафика.

– Доказано, что полученные последовательности интенсивности трафика, интервалов времени между поступлением пакетов и интервалов времени обслуживания трафика обладают самоподобием. Определена степень самоподобия всех зарегистрированных последовательностей методом анализа R/S -статистики.

2. Определены и проанализированы законы распределения (плотности вероятностей) для всех экспериментальных последовательностей в аналитической и графической форме.

– Определено, что плотность вероятностей интервалов времени обслуживания пакетов мультимедийного трафика имеет бимодальное распределение, и наиболее корректно может быть аппроксимирована распределением смеси.

3. Разработана методика решения ИУ Линдли спектральным методом для системы $G/G/1$, в которой учтен бимодальный характер распределения плотности вероятностей интервалов времени обслуживания.

– Показано, что бимодальный характер плотности вероятностей времени обслуживания мультимедийного трафика приводит к заметному увеличению времени ожидания пакетов в очереди в системе $G/G/1$.

4. Выполнен расчет временных характеристик системы $G/D/1$, основанный на использовании математического аппарата классической ГМО.

– Определено, что при обработке мультимедийного трафика с бимодальным распределением времени обслуживания пакетов системой $G/G/1$, время ожидания пакета в очереди меньше, чем в системе $G/D/1$ с фиксированным временем обработки пакета.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКФ – автокорреляционная функция

ВОЛП – волоконно-оптическая линия передачи

ДВЗ – долговременная зависимость

ИУ – интегральное уравнение

КТВ – кабельное телевидение

МСС (Мультисервисная сеть связи) – инфраструктура, использующая единый канал для передачи данных разных типов трафика

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

ПП – полоса пропускания

РТХ – распределения с тяжелыми хвостами

СКО – среднеквадратичное отклонение

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений

СМО – система массового обслуживания

СПД – сеть передачи данных

ТМ – точка мониторинга

ТМО – теория массового обслуживания

ФБД – фрактальное броуновское движение

ЦПТ – центральная предельная теорема

ЧНН – час наибольшей нагрузки

ШПД – широкополосный доступ

BRAS (Broadband Remote Access Server) – маршрутизатор широкополосного удалённого доступа

CAS (Conditional Assess System) – система условного доступа

DiffServ (Differentiated Service) – дифференцированное обслуживание

DSCP (Differentiated Services CodePoint) – кодовые точки дифференцированных (различных) служб

DVB (Digital Video Broadcasting) – семейство стандартов цифрового телевидения, разработанных международным консорциумом DVB Project

DVB-IP – семейство стандартов DVB для передачи телевидения по IP-сети

DVB-S/S2 – семейство стандартов DVB для передачи телевидения через спутниковые сети первого / второго поколения

DVB-T/T2 – семейство стандартов DVB для передачи телевидения через наземные сети первого / второго поколения

G/D/1 – СМО с одной обслуживающей линией, произвольным входящим потоком, детерминированным распределением времени обслуживания

G/G/1 – СМО с одной обслуживающей линией, произвольным входящим потоком, произвольным распределением времени обслуживания

G/G/n – СМО с *n* обслуживающими линиями, произвольным входящим потоком, произвольным распределением времени обслуживания

GOF (Goodness of fit) – критерий согласия

HeadEnd – головная станция для системы телевидения

IDC (Index of Dispersion for Counts) – индекс дисперсии для отсчетов

IETF (Internet Engineering Task Force) – техническая комиссия Интернет, разрабатывающая документы RFC

IGMP (Internet Group Management Protocol) – протокол управления группами (пользователей) в сети Интернет

IGMP v.1, v.2, v.3 – 1, 2, 3 версии протокола IGMP

Internet-TV (Internet Television) – интернет телевидение

IntServ (Integrated Service) – интегрированное обслуживание

IP (Internet Protocol) – интернет протокол

IPTV (Internet Protocol Television) – технология передачи телевидения по IP-сети

ISO/IEC (International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission (Committee)) – Международная организация по стандартизации / Международная электротехническая комиссия; МЭК

ITU (International Telecommunications Union) – Международный союз электросвязи; МСЭ

ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector) – сектор стандартизации электросвязи МСЭ

M/M/1 – СМО с одной обслуживающей линией, экспоненциальным входящим потоком, экспоненциальным распределением времени обслуживания

M/M/n – СМО с *n* обслуживающими линиями, экспоненциальным входящим потоком, экспоненциальным распределением времени обслуживания

MEN (Metropolitan-area ethernet network) – инфокоммуникационная сеть крупного города, сеть Metro Ethernet

Middleware – связующее программное обеспечение

MPEG (Motion Pictures Expert Group) – группа экспертов по движущимся изображениям; группа стандартов сжатия аудио- и видеоинформации

MPEG-2 – стандарт цифрового сжатия аудио- и видеоинформации

NAT (Network Address Translation) – это механизм в сетях TCP/IP, позволяющий преобразовывать IP-адреса транзитных пакетов

NVoD (Near Video On Demand) – почти видео по требованию; сервис цифрового телевидения «виртуальный кинозал»

OSS/BSS (Operation Support System / Business Support System) – система поддержки операций / система поддержки бизнеса

PON (Passive Optical Network) – технология пассивных оптических сетей

PRV (Personal Video Recorder) – персональный видеомаягнитофон

QoE (Quality of Experience) – качество восприятия услуг

QoS (Quality of Service) – качество услуг связи

RTP (Real-time Transport Protocol) – транспортный протокол реального времени

RTCP (Real-time Transport Control Protocol) – протокол контроля транспортировки информации в реальном времени

RTSP (Real Time Streaming Protocol) – потоковый протокол реального времени

SSL (Secure Sockets Layer) – уровень защищённых программ, который обеспечивает безопасность связи

STB (Set-Top Box) – ресивер IPTV, ресивер цифрового телевидения, телевизионный приёмник (приставка)

ToS (Type of Service) – тип службы (сервиса)

TVoIP (Television over Internet Protocol) – технология передачи телевидения «поверх» IP-сети

UDP (User Datagram Protocol) – протокол пользовательских дейтаграмм

VLAN (Virtual Local Area Network) – логическая («виртуальная») локальная компьютерная сеть

VPN (Virtual Private Network) – виртуальная частная сеть

VoD (Video on Demand) – видео по запросу (требованию)

xDSL (x Digital Subscriber Link) – технология цифровой абонентской линии, символ «x» используется для обозначения первого символа в названии конкретной технологии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автокорреляционная функция. Примеры расчётов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.newreferat.com/ref-671-1.html> – Загл. с экрана (дата обращения 20.03.2013).
2. Агеев, Д.В. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия / Д.В. Агеев, А.А. Игнатенко, А.Н. Копылев // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2011. – №3(5). – с. 18-36.
3. Аджемов А.С., Васильев А.Б., Кучерявый А.Е. Перспективные направления развития сетей связи общего пользования / А.С. Аджемов, А.Б. Васильев, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2008 – № 10 – с. 6-7.
4. Анализ свойства самоподобия трафика веб-ресурса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://morozov.krc.karelia.ru/articles/kp/> – Загл. с экрана (дата обращения 25.09.2011).
5. Аппроксимация функций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://physics.herzen.spb.ru/library/01/01/nm_labs/approximation.htm – Загл. с экрана (дата обращения: 27.08.2013).
6. Арбузов, П.В. Основы высшей математики. Глава 6. Случайные величины. 6.4. Непрерывные случайные величины. Плотность распределения вероятностей [Электронный ресурс] / П.В. Арбузов, С.В. Гуде, В.Н. Герасименко, Д.В. Медянцев. – Режим доступа: <http://posobie-mii.narod.ru/Glava6.4.htm> – Загл. с экрана (дата обращения: 25.12.2012).
7. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов / С.И. Баскаков. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 304 с.
8. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.Н. Кобельков. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 632 с.

9. Бейтмен, Г. Таблицы интегральных преобразований. Том 1. Преобразование Фурье, Лапласа, Меллица (серия: «Справочная математическая библиотека») / Г. Бейтмен, А. Эрдейн. – М.: Наука. – 1968. – 344 с.
10. Бельков, Д.В. Анализ сетевого трафика методом агрегирования [Электронный ресурс] / Д.В. Бельков, Е.Н. Едемская. – Режим доступа: <http://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/3247/1/Анализ%20сетевого%20трафика%20методом%20агрегирования.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения 23.04.2014).
11. Бителева, А. Принципы IPTV-вещания / А. Бителева // Телеспутник. – 2012. – №10. – с. 24-27.
12. Бителева, А. Семинар WISI. Часть 2. Решения для оптики / А. Бителева // Телеспутник. – Август 2009. – №8(166). – с. 74.
13. Буранова, М.А. Исследование статистических характеристик самоподобного телекоммуникационного трафика / М.А. Буранова // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – №4. – Том 10. – с. 35-41.
14. Ващенко, Г.В. Вычислительная математика. Основы конечных методов решения систем линейных алгебраических уравнений [Электронный ресурс] / Г.В. Ващенко. – Режим доступа: <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Vashchenko2005ru.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения: 25.05.2014).
15. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 576 с.
16. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные применения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 284 с.
17. Венцлавович, Э.Е. R/S анализ временных рядов излучения импульсного электроионизационного СО-лазера / Э.Е. Венцлавович, В.С. Казакевич.

- // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2007. – т.9, №3. – с. 26-30.
18. Вержбицкий, В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): Учеб. пособие для вузов / В.М. Вержбицкий.– М.: Высшая школа, 2001. – 382 с.
 19. Гипотезы и критерии согласия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gsu.by/biglib/GSU/Математический/ЭКиТВ/рук-лаб-МС/5%20Гипотезы%20и%20критерии%20согласия.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения: 12.02.2014).
 20. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: ЛКИ, 2011. – 402 с.
 21. Головные станции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.telecomtv.ru/stations> – Загл. с экрана (дата обращения: 17.12.2011).
 22. Головные станции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tvtech.ru/golovnye-stancii-head-end-stations/> – Загл. с экрана (дата обращения: 24.12.2011).
 23. Гуда, А.Н. Модели оценки параметров телекоммуникационного трафика в автоматизированных информационно-управляющих системах [Электронный ресурс] / А.Н. Гуда, М.А. Бутакова, Н.А. Москат– Режим доступа: <http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2010/02/12.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения 28.04.2014).
 24. Деарт, В.Ю. Исследование параметров качества обслуживания (QoS), определяющих качество восприятия пользователем (QoE) потокового видео при передаче через Интернет / В.Ю. Деарт, И.С. Кожухов // Т-Comm. – 2013. –№7.
 25. Демидов, А.С. Алгоритмы реализации приоритетного обслуживания и повышения утилизации полосы пропускания при предоставлении услуги IPTV в сетях Ethernet / А.С. Демидов // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011),

- Секция 4. Web-технологии, Интернет и информационная безопасность.
– с. 86 – 90.
26. Зубарев, Ю.Б. Цифровое телевидение / Ю.Б. Зубарев, М.И. Кривошеев, И.Н. Красносельский. – М.: Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. – 573 с.
 27. Идлис, А. Развертывание сети ШПД на базе Ethernet-доступа: вопросы и ответы. Часть 1. Быстрее, шире, доступнее. Архитектура сети ШПД/ А. Идлис // Телеспутник. – 2010. – №7. – с. 36-40.
 28. Интерполяция функций интерполяционными полиномами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/spline/book1/10.php> – Загл. с экрана (дата обращения: 24.05.2014).
 29. Карташевский, В.Г. Влияние механизмов управления QOS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet / В.Г. Карташевский, М.А. Буранова // Т-Comm. – 2013. – №8. – с. 54-60.
 30. Карташевский, В.Г. Основы теории массового обслуживания. Учебник для Вузов / В.Г. Карташевский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 126 с.
 31. Карташевский, В.Г. Основы теории массового обслуживания: учебное пособие для вузов / В.Г. Карташевский. – М.: Радио и связь, 2006. – 107 с.
 32. Карякин, В.Л. Цифровое телевидение / В.Л. Карякин. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 272 с.
 33. Кёниг, Д. Методы теории массового обслуживания / Д. Кёниг, Д. Штойян. – М.: Радио и связь, 1981. – 127 с.
 34. Киреева, Н.В. Исследование самоподобного трафика с использованием пакета FRACTAN / Н.В. Киреева, М.А. Буранова // Т-Comm. – 2012. – №5. – с.50-52.

35. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями. Перевод с англ. под ред. Б. С. Цыбакова / Л. Клейнрок. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
36. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. /Пер. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
37. Кобзарь, Л.С. Использование параметра качества восприятия в системе IPTV [Электронный ресурс] / Л.С. Кобзарь // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – №3(15). – с. 82. – Режим доступа: <http://ru.scribd.com/doc/84119299/16-Kobzar> – Загл. с экрана (дата обращения: 03.04.2011).
38. Кобринович, Ю.О. IPTV – телевидение нового поколения / Ю.О. Кобринович // «Наука и техника». – 2009. – №7(38).
39. Кокс, Д. Теория очередей / Д. Кокс, У. Смит. Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 223 с.
40. Колпаков, И.А. IP-телевидение начинается с головной станции / И.А. Колпаков, А.И. Барг, С.Ю. Колгатин // «Кабельщик». – 2006. – №10.
41. Колпаков, И.А. Современная цифровая головная станция: строим так, чтобы завтра не выбрасывать. Часть 2 / И.А. Колпаков, А.И. Барг // «Кабельщик». – 2009. – №8.
42. Косарев, А. Бизнес в интерактивном телевидении (IPTV) [Электронный ресурс] / А. Косарев // «Broadcasting. Телевидение и радиовещание» – 2006. – №1. – Режим доступа: http://www.broadcasting.ru/articles2/econandmen/business_interact – Загл. с экрана (дата обращения: 15.10.2011).
43. Крамер, Г. Математические методы статистики / Пер. с англ. А.С. Мони́на и А.А. Петро́ва, под ред. академика А.Н. Колмогорова. – 2-е изд, стереотипное. – М: Мир, 1975. – 648 с.
44. Критерии согласия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sernam.ru/book_tp.php?id=34 – Загл. с экрана (дата обращения: 13.01.2014).

45. Критерии согласия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vevivi.ru/best/Kriterii-soglasiya-ref172473.html> – Загл. с экрана (дата обращения: 27.04.2014).
46. Лагутин, В.С. Телетрафик мультисервисных сетей / В.С. Лагутин, С.Н. Степанов. – М.: Радио и связь, 2000. – 320 с.
47. Лихачев, Н. Мультисервисные сети и технология IPTV / Н. Лихачев // «Connect! Мир Связи» – 2007. – №3. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sstm.ru/publications/Cn-IPTV.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения: 04.08.2011).
48. Локшин, Б.А. Цифровое вещание. От студии к телезрителю / Б.А. Локшин. – М.: САЙРУС СИСТЕМС, 2001. – 446 с.
49. Маколкина, М.А. Методы оценки качества обслуживания IPTV: учебное пособие / М.А. Маколкина. – СПб.: Изд-во СПбГУТ, 2012. – 16 с.
50. Навигация и управление летательными аппаратами. Труды московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). Выпуск 3. Под редакцией к.т.н. А.Г. Кузнецова. – Москва, 2011. – 98 с.
51. Назаров А.Н. Модели и методы расчёта показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н. Назаров, К.И. Сычев. – Красноярск: Полииздат, 2010. – 390 с.
52. Нейман, В.И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика / В.И. Нейман. // Труды Международной академии связи. – 1999. – №3. – с. 11-15.
53. Оптимизация передачи видео по сети IP Triple Play [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cisco.com/web/RU/downloads/Video_over_IP_Triple_Play.PDF – Загл. с экрана (дата обращения: 04.08.2011).

54. Передача Unicast, Broadcast и Multicast трафика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/tech.php?id=iptype> – Загл. с экрана (дата обращения: 28.01.2013).
55. Петров, В.В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.В. Петров. – Москва, 2004. – с. 199.
56. Постовалов, С.Н. Математическая статистика. Учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации Новосибирский государственный технический университет / С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова, В.С. Карманов. – 2012. – 159 с.
57. Программа-снифер сетевого трафика [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.wireshark.org/> – Загл. с экрана (дата обращения 25.02.2013).
58. Прохоров, С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов / С.А. Прохоров. – Самара: СГАУ, 2001. – 329 с.
59. Саати, Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т.Л. Саати. – М.: Советское радио, 1965. – 510 с.
60. Самойлов, М.С. Анализ вероятностных характеристик передачи трафика в сетях IPTV / М.С. Самойлов // Труды 14-й Международной Конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2012. – вып.: XIV, с. 411-414.
61. Самойлов, М.С. Анализ статистических характеристик интенсивности видеотрафика в сети IPTV / М.С. Самойлов // Труды 68-ой Международной Конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». – Москва, 2013. – вып.: LXVIII, с. 75-77.
62. Самойлов, М.С. Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика узла агрегации в мультисервисной сети / М.А. Буранова, В.Г. Карташевский, М.С. Самойлов //

Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – №4. – с. 63-69.

63. Самойлов, М.С. Анализ трафика в современных телекоммуникационных сетях / М.С. Самойлов // Труды XII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань, 2011. – с.214-215.
64. Самойлов, М.С. Влияние статистических свойств мультимедийного трафика узла агрегации мультисервисной сети на качество сетевого управления / М.А. Буранова, В.Г. Карташевский, М.С. Самойлов // Сборник научных докладов первого всероссийского конгресса «Приоритетные технологии: актуальные вопросы теории и практики». – г. Волгоград, 2014 г. – с.159-164.
65. Самойлов, М.С. Исследование распределений вероятностей трафика пользовательского узла доступа / М.С. Самойлов // Труды 24-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). – Севастополь, 2014. – Том 1, с. 405-406.
66. Самойлов, М.С. Исследование статистических свойств мультимедийного трафика / М.А. Буранова, М.С. Самойлов // Труды 16-й Международной Конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, 2014. – вып.: XVI-1, с. 234-236.
67. Самойлов, М.С. Преимущества и недостатки стандарта цифрового телевизионного вещания DVB-T2 / М.С. Самойлов // Тезисы докладов IXX Российской научной конференции, ПГУТИ. – Самара, 2012. – с. 60.
68. Самойлов, М.С. Преимущества передачи видеотрафика по сетям IP / М.С. Самойлов // Тезисы докладов XX Российской научной конференции, ПГУТИ. – Самара, 2013. – с. 195.
69. Самойлов, М.С. Применение протокола IGMP в сетях IPTV / М.С. Самойлов // Тезисы докладов XXI Российской научной конференции, ПГУТИ. – Самара, 2014. – с. 99.

70. Самойлов, М.С. Решение ИУ Линдли для СМО с бимодальным распределением времени обслуживания / М.С. Самойлов // Труды XV МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань, 2014. – с.158-160.
71. Самойлов, М.С. Сопоставление преимуществ и недостатков Internet TV и IPTV / М.С. Самойлов // Труды XIV МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Самара, 2013. – с. 165-167.
72. Самойлов, М.С. Спектральное решение интегрального уравнения Линдли для узла мультисервисной сети при обслуживании мультимедийного трафика / М.С. Самойлов // Электросвязь. – 2014. – №11. – с. 36-39.
73. Самойлов, М.С. Сравнительный анализ статистических характеристик видеотрафика в сетях пакетной передачи данных / М.А. Буранова, В.Г. Карташевский, М.С. Самойлов // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – №4. – Том 12. – с. 33-38.
74. Самойлов, М.С. Сравнительный анализ статистических характеристик интенсивности трафика сети IPTV многоадресной и одноадресной передачи / М.С. Самойлов // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии: матер. I Междунар. Науч.-техн. Конф. – Харьков, 2013. – с. 128-131.
75. Самойлов, М.С. Статистическое исследование мультимедийного трафика пользовательского узла доступа / М.С. Самойлов // Труды 69-ой Международной Конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». – Москва, 2014. – вып.: LXIX, с. 148-151.
76. Самойлов, М.С. Требования к возможностям транспортной сети для поддержки услуг IPTV / М.С. Самойлов // Труды XIV МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Самара, 2013. – с. 167-169.

77. Сети Агрегации и доступа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.telecor.ru/technology/solutions/ethernet/> – Загл. с экрана (дата обращения: 02.08.2011).
78. Система Middleware от NetUP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.netup.tv/ru-RU/middleware.php> – Загл. с экрана (дата обращения: 10.05.2013).
79. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 392 с.
80. Тарасов, Д.В. Особенности видеотрафика для сетей связи следующего поколения / Д.В. Тарасов, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2010. – №1. – с. 37-43.
81. Услуги IPTV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/tech.php?id=iptvus> – Загл. с экрана (дата обращения: 08.04.2014).
82. Федорова, М.Л. Об исследовании свойства самоподобия трафика мультисервисной сети [Электронный ресурс] / М.Л. Федорова, Т.М. Леденева. – Режим доступа: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2010/01/2010-01-09.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения 28.04.2014).
83. Филимонов, А. Ю. Построение мультисервисных сетей Ethernet / А. Ю. Филимонов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 592с.
84. Фомин, В.В. Статистический анализ IP и VoIP трафика / В.В. Фомин // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – №1. – Том 7. – с. 40-44.
85. Харченко, М.А. Корреляционный анализ. Учебное пособие для вузов / М.А. Харченко. – Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 31 с.
86. Хинчин, А.Я. Математические методы теории массового обслуживания / Труды математического института им. В.А. Стеклова. – М.: Изд. АН СССР, 1955. – 122 с.

87. Численные методы решения прикладных задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://portal.tpu.ru/departments/kafedra/eafu/obrazovanie/informatika/Tab_met/chisl_metody.pdf – Загл. с экрана (дата обращения: 16.05.2014).
88. Чупахина, Л.Р. Аппроксимация плотности распределения Парето суммой затухающих экспонент / И.А. Блатов, В.Г. Карташевский, Н.В. Киреева, Л.Р. Чупахина // Сбор. науч. тр. Первой Междунар. научно-практ. конф. «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии» (PICS&T-2013). – Харьков, 2013. – с. 132-134.
89. Чупахина, Л.Р. Метод аппроксимации произвольной плотности распределения суммами экспонент / И.А. Блатов, В.Г. Карташевский, Н.В. Киреева, Л.Р. Чупахина // Вестник ВГУ. – 2013. – №2. – с. 53-57.
90. Шелухин, О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
91. Шелухин, О.И. Мультифракталлы. Инфокоммуникационные приложения / О.И. Шелухин. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2011. – 578 с.
92. Шелухин, О.И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О.И. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
93. Энциклопедия АСУ ТП: 4 Измерительные каналы: 4.1 Основные понятия: 4.1.3 Функция автокорреляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_3.aspx – Загл. с экрана (дата обращения 17.02.2013).
94. Программа FRACTAN v4.4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sfg.dp.ua/page_soft.php?id=396 – Загл. с экрана (дата обращения: 13.01.2013)

95. Crovella, M. Long-lasting transient, conditions in simulations with heavy-tailed workloads / M. Crovella, L. Lipsky. // Proc 1997 Winter Simulation Conference. – 1997.
96. Crovella, M.E. Self-similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes / M.E. Crovella, A. Bestavros // Proceedings of the 1996 ACM SIGMET-RICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. – May 1996.
97. EasyFit: описание и функции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.softsalad.ru/software/easyfit.html> – Загл. с экрана (дата обращения: 03.04.2014).
98. Erramilli, A. Willinger W. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic / A. Erramilli, O. Narayan // IEEE/ACM Transactions on Networking. – April 1996.– Vol.4, №2. – p. 209-223.
99. ETSI TS 101 154 (V1.8.1) Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream.
100. ETSI TS 102 034 V1.4.1 (2009-08) Technical Specification. Digital Video Broadcasting (DVB); Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks.
101. ETSI TS 181 014 V2.0.0 (2007-11) Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking (TISPAN); Requirements for network transport capabilities to support IPTV services.
102. Gripenberg, G. On the prediction of fractional Brownian motion / G. Gripenberg, I. Norros. // Journal of Applied Probability. – 1996.
103. Heyman, D.P. Source models for VBR broadcastvideo traffic / D.P. Heyman, T.V. Lakshman. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1996. – Vol.4. – p. 40-48.
104. IETF RFC 1042 A Standard for the Transmission of IP Datagrams over IEEE 802 Networks.

105. IETF RFC 1633, Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview.
106. IETF RFC 2236 October 2002 Internet Group Management Protocol, Version 3.
107. IETF RFC 2250 RTP Payload Format for MPEG1/MPEG2 Video.
108. IETF RFC 2326 Real Time Streaming Protocol (RTSP).
109. IETF RFC 2474 Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers.
110. IETF RFC 2474, Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers.
111. IETF RFC 2475, An Architecture for Differentiated Services.
112. IETF RFC 3550 RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications.
113. IETF RFC 3550 RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications.
114. IETF RFC 791 Internet Protocol; DARPA internet protocol; Protocol specification.
115. IETF RFC 826 An Ethernet Address Resolution Protocol- or-converting Network Protocol Addresses to 48 bit Ethernet Address for Transmission on Ethernet Hardware.
116. IETF RFC1112 Host Extensions for IP Multicasting, August 1989.
117. IETF RFC919 Broadcasting Internet Datagrams, October 1984.
118. ISO/IEC 13818-9 (1996) Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information - Part 9: Extension for real time interface for systems decoders.
119. ITU-T G.1080, Quality of experience requirements for IPTV services, 12, 2008.
120. IETF RFC768 User Datagram Protocol, August 1980.
121. Jena, A.K. A. Modeling and Evaluation of Network Applications and Services / A.K. Jena, P. Pruthi, A. Popescu // Proceedings of the RVK 99 Conference. – Ronneby, Sweden. – June 1999.

122. Karlen, D. Using projections and correlations to approximate probability distributions / D. Karlen // *Comput.Phys.* – 1998. – Vol.12, № 4. – p. 380-384.
123. Leland, W.E. On the self-similar nature of Ethernet traffic (Extended version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson. // *IEEE/ACM Transactions on Networking.* – 1994. – № 2. – p. 1-15.
124. Matthew, N.O. Sadiku: An alternative to traditional cable and satellite television / N.O. Matthew // *IEEE Potentials.* – July 2011.
125. Metro Ethernet по технологии PPPoE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.telecor.ru/technology/solutions/metroethernet/> – Загл. с экрана (дата обращения: 02.08.2011).
126. Molnar, S. Fractal characterization of network traffic from parameter estimation to application. PhD. dissertation, Budapest university of technology and economics dept. of telecommunications and telematics / S. Molnar, A. Vidacs. – Budapest, Hungary. – 2000.
127. Network tools and traffic traces [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.grid.unina.it/Traffic/Traces/ttraces.php> – Загл. с экрана (дата обращения 15.10.2013).
128. Norros, I. A Storage Model with Self Similar Input / I. Norros. // *Queueing Systems.* – 1994. – № 16. – p. 387-396.
129. Norros, I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks / I. Norros. // *J. Sel. Areas in Commun.* – 1995. – № 13(6). – p. 953-962.
130. Park, K. Self-Similar Network Traffic: An Overview [Электронный ресурс] / K. Park. – Режим доступа: <http://pi.314159.ru/park1.pdf> – Загл. с экрана (дата обращения 17.09.2013).
131. Ryu, B.K. Point process models for self-similar network traffic, with applications Text / B.K. Ryu, S.B. Lowen. // *Stochastic models.* – 1998. – p. 1468-1475.

132. Willinger, W. A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks [Электронный ресурс] / W. Willinger, M.S. Taqqu, A. Errimilli. – Режим доступа: <http://linkage.rockefeller.edu/wli/reading/taqqu96.pdf>. – Загл. с экрана (дата обращения 08.10.2011).