

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

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

На правах рукописи

Мохаммед Ала Абдулрахман Саид

**МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА  
ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА В СЕТИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук,

старший научный сотрудник

Соколов Николай Александрович

Санкт-Петербург

2016

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>Глава 1. Анализ принципов декомпозиции показателей <i>QoS</i> в сети класса <i>NGN</i>....</b>	<b>12</b>
1.1. Принципы построения сети класса <i>NGN</i> .....	12
1.2. Требования к сетевым показателям качества.....	17
1.2.1. Общая информация о классах <i>QoS</i> .....	17
1.2.2. Канал передачи данных для классов <i>QoS</i> через интерфейс <i>UNI-UNI</i> .....	22
1.2.3. Классы сетевого <i>QoS</i> .....	24
1.3. Подходы к декомпозиции показателей <i>QoS</i> .....	32
1.4. Анализ результатов исследований в части декомпозиции показателей <i>QoS</i> .....	35
Выводы.....	38
<b>Глава 2. Декомпозиция показателей <i>IPTD</i> и <i>IPLR</i>.....</b>	<b>40</b>
2.1. Математическая модель маршрута обмена <i>IP</i> -пакетами.....	40
2.2. Аналитическое исследование средней задержки <i>IP</i> -пакетов.....	45
2.2.1. Модели на основе простейших СМО.....	45
2.2.2. Модель на основе системы массового обслуживания <i>G/G/1</i> .....	48
2.2.3. Декомпозиция задержки на маршруте.....	51
2.3. Аналитическое исследование вероятности потери <i>IP</i> -пакетов.....	54
2.4. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений.....	58
2.4.1. Выбор средств имитационного моделирования.....	58
2.4.2. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений <i>IPTD</i> .....	64
2.4.3. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений <i>IPLR</i> .....	66
Выводы.....	67
<b>Глава 3. Декомпозиция показателя <i>IPDV</i>.....</b>	<b>69</b>
3.1. Задачи оценки квантиля распределения времени задержки <i>IP</i> -пакетов.....	69
3.2. Аналитическое исследование квантиля для расчета показателя <i>IPDV</i> .....	71
3.3. Точечные и интервальные оценки.....	77

3.3.1. Интервальные оценки вероятностных параметров <i>NGN</i> .....	79
3.3.2. Интервальные оценки временных параметров <i>NGN</i> .....	79
3.4. Оценка погрешности в расчете <i>IPDV</i> .....	82
3.5. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений.....	88
Выводы .....	93
<b>Глава 4 . Рекомендации по декомпозиции показателей <i>QoS</i> в сети класса <i>NGN</i>.....</b>	<b>94</b>
4.1. Особенности взаимоотношений операторов связи для поддержки <i>QoS</i> .....	94
4.2. Принципы учета затрат оператора связи на поддержку <i>QoS</i> .....	97
4.3. Рекомендации по декомпозиции показателей <i>QoS</i> .....	105
Выводы .....	108
Заключение .....	110
Список сокращений .....	112
Список литературы .....	113
Приложение 1. Сведения об использовании результатов исследований .....	121
Приложение 2. Результаты вспомогательных расчетов.....	125

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Эволюция инфокоммуникационной системы в настоящее время достигла уровня, при котором практически все отношения между людьми, между машинами и людьми, а также между машинами в той или иной степени включают в себя процессы обмена информацией. В современных системах связи происходит слияние телекоммуникационных и вычислительных технологий, которые обеспечивают доставку и обработку информации, т.е. предоставлении инфокоммуникационных услуг [12, 14, 29, 46]. Благодаря росту функциональности сетевого и абонентского оборудования расширяется ассортимент предоставляемых услуг, рост их проникновения и качества [68, 73].

Телекоммуникационные сети функционируют как системы массового обслуживания [3, 36, 63], результатом работы которых является предоставление услуг пользователям. Важнейшими характеристиками и одним из набора критериев принятия технических решений при построении и эксплуатации систем и сетей связи являются показатели качества обслуживания.[55]. Соответствующие показатели становятся ограничениями при решении оптимизационных задач по развитию сети связи. Конечным "ценителем" качества предоставления услуг следует считать пользователя. Оценка пользователя всегда субъективна. Тем не менее, при некоторых условиях "массовая" оценка качества отражает уровень качества услуги как некое качество восприятия (*QoE – Quality of Experience*) [96]. Оценка *QoE* характеризует степень удовлетворенности услугой, однако она неприемлема для технических служб операторов связи и проектных организаций, для которых необходимы измеряемые и/или рассчитываемые физические величины. В современных сетях связи определены физические параметры, значения которых можно контролировать в эксплуатируемых сетях или оценивать, используя аналитические или имитационные модели [21]. Эти параметры формируют набор показателей качества обслуживания трафика (*QoS – Quality of Service*). Определяющую роль в современных сетях играют показатели времени, характеризующие длительность доставки данных, и показатели достоверности, характеризующие вероятность потерь данных и ошибок в них. Эти

показатели в наибольшей степени влияют на *QoE*. Поэтому, международный союз электросвязи (МСЭ), а также государственные и отраслевые документы устанавливают для них определенные нормативные значения. Нормативные значения также могут устанавливаться и самим оператором связи, если это не противоречит руководящим документам, в соглашении об уровне обслуживания [23, 59, 62, 70]. Оно известно по сокращению *SLA – Service Layer Agreement*.

Большинство телекоммуникационных услуг предоставляется при взаимодействии сетей нескольких операторов связи. Каждый из операторов предоставляет некую долю ресурсов своей сети для предоставления услуги. При этом качество предоставления обслуживания *QoS* нормируется между интерфейсами пользователь-сеть (ИПС). Это значит, что все взаимодействующие операторы должны выполнить некоторую работу на контролируемых ими участках, необходимую для обеспечения качества. Эта работа, в общем случае, может быть различна для разных операторов. При этом нормативный показатель должен быть распределен по сферам ответственности различных операторов связи, т.е. выполнена его декомпозиция [55]. В условиях, когда сети операторов могут иметь различные возможности, обслуживать различное количество пользователей (не идентичный объем трафика), подход в том виде, который изложен в рекомендации Y.1542 для декомпозиции показателей *QoS*, не всегда рационален.

Для решения задач по поддержке показателей качества обслуживания мультисервисного трафика в сети следующего поколения (в сети NGN – *Next Generation Network*) необходимо распределить нормированные величины по основным элементам телекоммуникационной системы. Показатели качества обслуживания мультисервисного трафика для сети NGN нормированы между ИПС (интерфейсами *UNI* в англоязычной технической литературе, посвященной электросвязи). Для распределения (декомпозиции) показателей необходимо разработать математическую модель маршрута обмена *IP*-пакетами между интерфейсами *UNI*. Для этой модели следует разработать методы оценки характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика. Далее нужно предложить алгоритм декомпозиции показателей качества обслуживания мультисервисного трафика. Эти результаты позволят предложить ме-

тодику распределения нормируемых показателей по всем основным элементам сети NGN. Такая методика позволит организовать процесс работы сети NGN, которая обеспечит соблюдение нормируемых качественных показателей.

Декомпозиция показателей *QoS* должна обеспечивать выполнение нормативов, учитывая особенности сетей связи операторов и их интересы. Решению данной проблемы и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Степень разработанности темы.** Вопросы качества обслуживания рассмотрены в ряде рекомендаций сектора стандартизации Международного союза электросвязи (*ITU-T*). Также в рекомендациях *ITU-T* нашли отражение и некоторые вопросы декомпозиции показателей *QoS*. В частности, в рекомендации *ITU-T Y.1542* [84] предлагается методика декомпозиции показателя задержки доставки пакетов данных [84]. Если учитывать различия операторов, предоставляющих услуги связи, то данная методика не всегда учитывает возможности взаимодействия операторов в части обеспечения качества услуг. Методы же декомпозиции других, не менее важных, показателей качества, таких как вариация задержки доставки пакета данных (джиттер), коэффициент потерь пакетов в нормативных и рекомендательных документах практически не рассматриваются. Существует ряд работ, посвященных подобным вопросам из других областей инфокоммуникационных технологий [99, 101]. Задачи построения NGN и анализ характеристики качества исследовались в работах отечественных (Б.С. Гольдштейн, В.А. Ефимушкин, В.И. Комашинский, А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, А.П. Пшеничников, К.Е. Самуйлов, Н.А. Соколов, С.Н. Степанов, М.А. Шнепс-Шнеппе, Г.Г. Яновский) и зарубежных (*U. Black, J. Davidson, S. Fisher, J. M. Garcia, D. McDysan, D. Minoli, F. A. Tobagi* и др.) авторов. Однако в настоящее время не существует метода декомпозиции показателей качества, который бы обеспечивал выполнение требуемых норм качества и позволял учесть особенности технических средств операторов связи и их интересы.

В настоящей диссертационной работе ставятся и решаются задачи, связанные с анализом и разработкой моделей декомпозиции показателей качества сетей с учетом особенностей сетей операторов связи и их интересов.

**Цель работы и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состоит в исследовании моделей функционирования сети *NGN* [77] и составлении – на базе полученных результатов – методики декомпозиции показателей *QoS*. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие задачи:

- Развитие метода декомпозиции для задержки доставки пакетов данных (показатель *IPTD* в рекомендациях *ITU-T*);
- Разработка метода декомпозиции для вариации задержки доставки пакетов данных (показатель *IPDV* в рекомендациях *ITU-T*);
- Развитие метода декомпозиции для вероятности потери пакетов данных (показатель *IPLR* в рекомендациях *ITU-T*);
- Формирование предложений по принципам взаимоотношений операторов связи для поддержки *QoS*;

**Научная новизна.** Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

- Предложена, обоснована и исследована модель маршрута обмена *IP*-пакетами, позволившая учесть особенность влияния основных факторов, определяющих показатели качества обслуживания мультисервисного трафика, с учетом необходимости их декомпозиции. Модель использована также для обоснования организационно-технических решений по оценке ресурсов разных операторов связи, участвующих в поддержке нормируемых показателей. Модель содержит переменное количество элементов (сетей разных операторов связи и/или конкретных компонентов в составе сетей), что определяется характером решаемых задач декомпозиции.
- Развита метод оценки показателя *IPTD* (средняя задержка доставки *IP*-пакетов), позволяющий провести декомпозицию этой величины за счет представления выражения для ее расчета в аддитивной форме. Разработан метод расчета показателя *IPDV* (вариация длительности задержки *IP*-пакетов), основанный на установленной линейной зависимости величины *IPDV* от количества узлов коммутации (в составе маршрута) и их

вероятностно-временных характеристик. Развита метод для расчета показателя *IPLR* (вероятность потери *IP*-пакетов), позволяющий использовать соотношение в мультипликативной форме за счет введения гипотезы о независимости процессов во всех элементах маршрута обмена *IP*-пакетами.

- Уточнен алгоритм оценки квантиля распределения задержки *IP*-пакетов путем использования разложения Эджворта. Это позволило восстановить функцию распределения времени задержки *IP*-пакетов по моментам данной случайной величины с приемлемой точностью.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в исследовании моделей декомпозиции показателей качества в сети *NGN* и в разработке методов их расчета. Практическая ценность работы заключается в возможности использования полученных результатов для планирования и эксплуатации сетей класса *NGN*, обеспечивающих установленные показатели *QoS* между интерфейсами *UNI*. Результаты работы использованы в СПбГУТ (учебный процесс, дисциплина, посвященная математическим методам расчета инфокоммуникационных систем) и в Северо-Западном филиале ПАО "ГИПРОСВЯЗЬ". В частности, "Методы декомпозиции основных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика (*IPTD*, *IPDV*, и *IPLR*)" применены при разработке следующих проектных решений:

- Строительство сети доступа *Wi-Fi* организация ядра *Wi-Fi* для публичного доступа в Интернет по технологии *Wi-Fi* на территории объектов недвижимости Уральского Федерального округа и Пермского края;
- Расширение мультисервисной сети МРФ "Сибирь" ОАО "Ростелеком" 2014".

**Методология и методы исследования.** При проведении исследований применялись методы теории вероятностей, теории телетрафика и имитационного моделирования. Для численных решений и промежуточных вычислений использовался программный математический пакет *Mathcad* 13.0. Имитационное моделирование маршрута пропуска трафика *IP*-сети выполнено с помощью пакета моделирования *AnyLogic*.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Построенная математическая модель маршрута обмена *IP*-пакетами позволяет решить две задачи. Первая задача заключается в декомпозиции показателей качества обслуживания мультисервисного трафика по компонентам сети связи следующего поколения. Вторая задача – разработка методики для оценки ресурсов, используемых разными операторами связи для организации маршрута между интерфейсами пользователь-сеть (*UNI*);

2. Предлагаемые методы декомпозиции параметров *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* позволяют решить задачи нормирования показателей качества обслуживания мультисервисного трафика по компонентам сети связи следующего поколения;

3. Алгоритм расчета квантиля, который необходим для расчета параметра *IPDV*, за счет использования ряда Эджворта обеспечивает приемлемую погрешность восстановления функции распределения задержки *IP*-пакетов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математических методов исследования и результатам имитационного моделирования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 69-й и 67-й конференции СПбНТОРЭС им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2013, 2014), II и IV Международной научно-технической и научно-методической конференции "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании" (Санкт-Петербург, 2013, 2015), 64-й, 69-й научно-технической конференции СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2012,), а также на заседаниях кафедры инфокоммуникационных систем СПбГУТ.

**Публикации.** Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках научно-технических конференций и в журналах отрасли. Всего опубликовано 9 работ, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 статья в журнале, включенном в РИНЦ, и 4 тезисов докладов в материалах научных конференции.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает содержание, введение, четыре главы, заключение, список сокращений и список литературы, вклю-

чающий 103 наименования и 2 приложения. Основная часть диссертационной работы (без приложений) изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 2 таблицы. Приложения изложены на 8 страницах машинописного текста.

**Личный вклад.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

#### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ способов декомпозиции показателей  $QoS$  в сети класса  $NGN$ , принципов построения сети  $NGN$ , существенных для дальнейшего исследования, набора показателей  $QoS$  в сети класса  $NGN$ , результатов исследований в части декомпозиции показателей  $QoS$ .

**Во второй главе** разработана математическая модель маршрута обмена  $IP$ -пакетами, выполнено аналитическое исследование средней задержки  $IP$ -пакетов, аналитическое исследование вероятности потери  $IP$ -пакетов, проведено имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений, дана трактовка полученных результатов для практической работы операторов связи.

**Третья глава** посвящена разработке метода декомпозиции показателя  $IPDV$ , решаются задачи оценки квантиля распределения времени задержки  $IP$ -пакетов, проведено аналитическое исследование квантиля для расчета показателя  $IPDV$ , выполнен анализ погрешности в расчете  $IPDV$ , разработана имитационная модель и получены результаты имитационного моделирования для проверки аналитических соотношений, проведен сравнительный анализ полученных результатов.

**В четвёртой главе** разработана методика и практические рекомендации по декомпозиции показателей  $QoS$  в сети класса  $NGN$ , проведен анализ особенностей взаимоотношений операторов связи для поддержки  $QoS$ , включая анализ принципов

учета затрат на поддержку *QoS*, сформулированы и разработаны рекомендации по декомпозиции показателей *IPTD*, *IPLR* и *IPDV*.

## Глава 1

### 1. Анализ принципов декомпозиции показателей *QoS* в сети класса *NGN*

#### 1.1. Принципы построения сети класса *NGN*

Процесс эволюции сетей связи сопровождается возникновением и распространением новых технологий. Наиболее массовое их проникновение наблюдается в сетях с наибольшим числом пользователей, т.е. в сети сотовой подвижной связи и в телефонной сети общего пользования (ТфОП). Процесс модернизации этих сетей направлен на создание сети *NGN*. Этот процесс предполагает полный переход к технологии коммутации пакетов и построению сети, отвечающей основным принципам, определенным в международных рекомендациях [79, 85, 86]. Поскольку данный процесс требует модернизации значительного объема оборудования существующих сетей связи, он не может быть осуществлен за короткий промежуток времени. Программы развития ТфОП на разных уровнях иерархии должны быть тщательно согласованы, чтобы процесс перехода к технологии коммутации пакетов осуществлялся при сохранении функциональности и качества услуг в сетях связи.

Построение сети следующего поколения осуществляется на основе так называемого принципа расширяющегося ядра [55]. На начальном этапе формирования *NGN* пакетные технологии используются только в "ядре" сети. Сначала должна быть создана междугородная *IP*-сеть. В некоторых странах уже были реализованы такие проекты. Стоимость подобных проектов определяется размером страны.

При модернизации городских и сельских телефонных сетей пакетные технологии начинают применяться уже за пределами сети междугородной связи [1, 15, 18, 47, 49, 67]. Данный процесс последовательно вовлекает в себя сети различного уровня, поэтому он может рассматриваться как расширяющееся ядро.

На рисунке 1.1 показана модель, иллюстрирующая варианты установления соединения между телефонными аппаратами двух местных сетей. Смена технологий коммутации может происходить в разных точках (они обозначены буквами латин-

ского алфавита). Эти точки расположены на границах с сетью *NGN*. Классический подход к построению *NGN* основан на том, что данные точки постепенно смещаются в сторону абонентских терминалов.

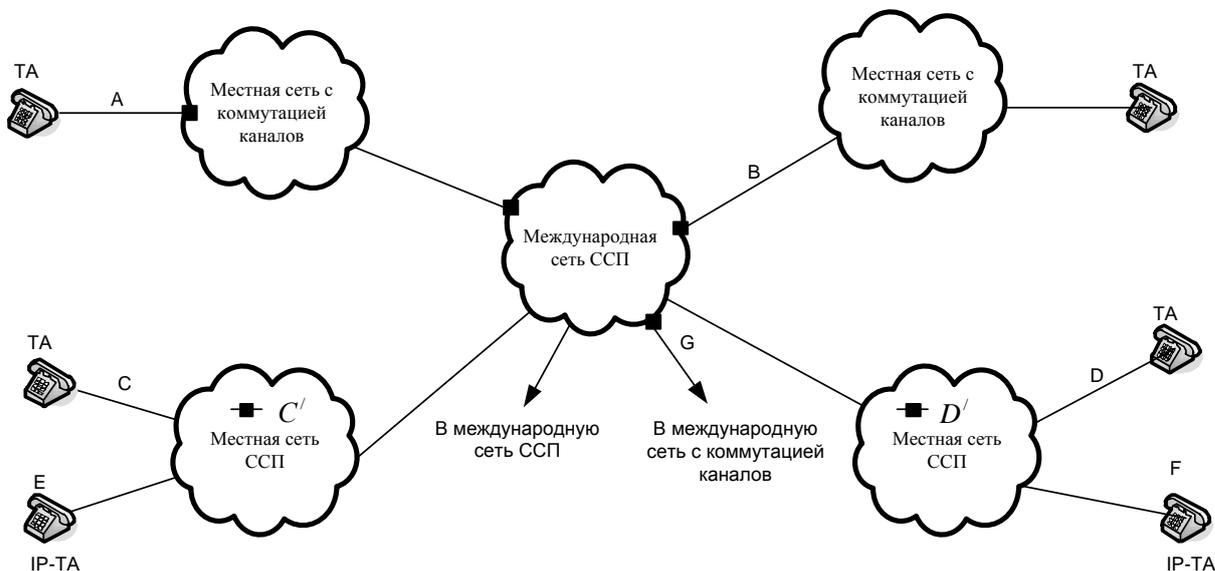


Рисунок 1.1 - Взаимодействие сетей с коммутацией каналов и коммутацией пакетов

Основным критерием для оценки функционирования сетей связи является качество предоставления услуг, так как услуга связи является тем продуктом, для производства которого строятся любые сети связи. Поэтому, одним из важных критериев при выборе решений, модернизации существующих сетей, построении новых сетей связи и их эксплуатации является обеспечение качества предоставления услуг.

Качество предоставления большинства современных услуг связи обеспечивается при выполнении нормативов на физические параметры функционирования сетей связи, параметры *QoS* (*Quality of Service*). Набор этих параметров определен в рекомендациях *ITU-T* [84, 91] и в отраслевых документах [23]. Следует отметить, что развитие *IT* технологий и технологий связи приводит к развитию новых услуг и изменению представлений о качестве; поэтому, возможно, что нормативы также будут эволюционировать.

В данной диссертационной работе рассматриваются подходы и методы декомпозиции показателей *QoS* между *UNI* (между интерфейсами пользователь-сеть) для технологии коммутации пакетов. Сети, построенные на основе технологии "комму-

тация пакетов", значительно отличаются от сетей, которые были реализованы на технологии "коммутация каналов". Эти различия можно рассматривать с нескольких точек зрения. В этой главе основное внимание уделяется различиям в части показателей качества обслуживания трафика. Основные особенности сетей с коммутацией пакетов можно охарактеризовать следующим образом:

Во-первых, современные сети с пакетной коммутацией являются мультисервисными, то есть обслуживают трафик различных услуг, например, передачи речи, видео и данных. Обычно они строятся на базе концепции *NGN* [16, 33, 37, 79,85, 86].

Во-вторых, для сетей с коммутацией пакетов вводятся показатели функционирования, характеризующие процесс обслуживания пакетного трафика. В первую очередь, это вероятностно-временные показатели и показатели достоверности, такие как математическое ожидание времени переноса пакетов (*IPTD*), вариация времени переноса пакетов (*IPDV*) и вероятность потери пакетов (*IPLR*) [88, 91].

В задачах планирования и эксплуатации сетей класса *NGN*, определении требований к их ресурсам (значениям пропускной способности трактов связи и производительности маршрутизаторов) требуется оценить численные значения параметров, которые необходимо обеспечить на проектируемом или эксплуатируемом участке сети. В общем случае рассматриваемый фрагмент сети (сеть оператора связи) участвует в предоставлении услуг связи, т.е. через него проходит лишь часть маршрута транспортировки данных. Норматив же качества должен быть обеспечен на всем маршруте, т.е. между пользовательскими интерфейсами *UNI–UNI*, которые в общем случае, могут быть в сетях. Для оценки целевых значений показателей качества на проектируемом или эксплуатируемом участке сети необходимо провести декомпозицию основных *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*, нормируемых на участке *UNI–UNI*, по всем основным элементам сети. В рекомендации *ITU-T Y.1542* [84] существуют два подхода для решения доставки *IP*-пакетов при сквозной передаче между двумя ИПС, подход распределения и накопления искажений.

На основании этих двух подходов рекомендованы несколько методов для выполнения норм показателей, которые приведены в рекомендации *Y.1541*. Статические методы делятся на следующие виды:

- метод статического делителя;
- метод статического распределения на основе эталонного тракта;
- метод взвешенных элементов.
- псевдостатический метод (оставлен для дальнейшего изучения );
- сигнализационные методы;
- метод интервального распределения;
- метод накопления искажений.

Кроме того, в рекомендации Y.1542 перечислены методы, оставленные для дальнейшего исследования:

Предполагается, что могут быть предложены методы, под названием "*Costed Bids Method*" и "*Bid Discovery Using a Global Registry*" [38, 84]. Эти методы учитывают технические и экономические факторы. Такой подход представляется весьма уместным с учетом различных возможностей участников телекоммуникационного рынка в части обеспечения требуемого уровня качества обслуживания трафика. Они обеспечивают соответствие требованиям к качеству обслуживания при минимуме затрат операторов связи и поставщиков инфокоммуникационных услуг.

В тексте рекомендации Y.1542 предпочтение отдается методу статического распределения на основе эталонного тракта. По этой причине именно этот метод исследуется в данной диссертационной работе.

В рекомендации Y.1542 изложены ключевые предложения по методу декомпозиции всех используемых показателей по качеству обслуживания трафика. Кроме того, новые методы декомпозиции показателей *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* позволят решить задачи заключения соглашений об уровне обслуживания – *SLA*, которые необходимы некоторой части клиентов и операторов связи [40].

Далее будем рассматривать декомпозицию наиболее значимых показателей качества *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* на примере модели сети *NGN*, которая предусматривает участие трех операторов связи в предоставлении услуги. Детализация подразумевает рассмотрение одного из важнейших свойств сети – ее возможности по минимизации

длительности задержки *IP*-пакетов каждым оператором связи. Предлагается учитывать эту возможность при распределении доходов от предоставленного вида услуг.

Для обеспечения соответствия значений показателей качества обслуживания трафика нормативам при обмене *IP*-пакетами между интерфейсами пользовательской сети требуется разработка новых методик их расчета для сети связи следующего поколения. Таким методом является декомпозиция показателей качества обслуживания трафика. Следует также учитывать, что тенденция заключения операторами соглашений *SLA* может приводить к созданию дополнительных требований к процедуре декомпозиции.

Известны два основных подхода к решению этой задачи. Первый заключается в распределении показателей качества между конечным числом сетей, которые участвуют в организации маршрута обмена *IP*-пакетами между двумя пользовательскими интерфейсами *UNI*, на основании известных методик, которые были разработаны и предложены Международным союзом электросвязи [84]. Второй метод основан на принципах заключения договоров между операторами связи, сущность которых схожа с заключением соглашений об уровне качества обслуживания *SLA*.

Недостатком методики, предложенной в [84] является то, что она не учитывает состояния сети *NGN* каждого оператора, участвующего в предоставлении услуги. В результате, в ряде случаев, качество услуг будет ниже требуемого уровня. Достоинство методики Международного союза электросвязи заключается в простоте используемых расчетов.

Достоинство методики, подразумевающей заключение договоренностей между всеми операторами связи, чьи сети задействованы в организации соединения, состоит в том, что она позволяет гарантировать качество обслуживания трафика. С другой стороны, методика декомпозиции показателей качества обслуживания, которые нормированы между парой *UNI*, заметно усложняется. Тем не менее, если соответствующие методы расчета сети *NGN* будут разработаны, то будет очевидно преимущество второго варианта декомпозиции показателей качества.

## 1.2. Требования к сетевым показателям качества

### 1.2.1. Общая информация о классах *QoS*

В данном разделе рассматриваются все требования сетевых показателей качества, которые используются для передачи информации пользователя при применении пакетных технологий. Они изложены в качестве параметров технических характеристик уровня *IP*, они определены в Рекомендации *ITU-T Y.1540* и *Y.1543* [88, 90]. Здесь можно отметить, что с точки зрения пользователя данные требования к сетевому *QoS* определены не для всех характеристик, а только как часть характеристик передачи данных [84, 95, 97].

Для определения классов *QoS* определяются границы значений сетевых показателей качества между *UNI-UNI*. В случае, когда пользователи (и отдельные операторы сети) не достигают превышенную согласованную величину пропускной способности или контракт на трафик, и канал передачи данных доступен (как определено в Рекомендации *ITU-T Y.1540*), Провайдеры сетевых услуг обязаны вместе обеспечить данные ограничения интерфейса *UNI-UNI* на все время сеанса связи.

Практическое сетевое *QoS*, которое предполагается для данного потока, будет зависеть от расстояния и "сложности", которые встретит пакет на своем пути. В данном случае слово "сложность" обозначает все потенциальные проблемы, которые прямо или косвенно связаны со всей совокупностью нормированных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика.

Зачастую качество будет выше, чем определяемое границами значений, описанными в классах *QoS* (таблица 1.1). Символ "Н" в таблице 1.1 обозначает "неопределенное" или "неограниченное" значение. В том случае, когда рабочая характеристика относится к конкретному параметру, значение которого определено как "Н", *ITU-T* не устанавливает конкретных требований для данного параметра. В таком случае любыми требованиями, определенными в рекомендации *Y.1541*, можно пренебречь. Маркировка параметра значением "Н" также означает, что рабочие характеристики по отношению к этому параметру могут временно произвольно ухудшаться в широких пределах.

Таблица 1.1 – Определения классов сетевого *QoS* протокола *IP* и требований к рабочим характеристикам сети

Параметр рабочей характеристики сети	Сущность требования к рабочей характеристике сети	Классы <i>QoS</i>					
		0	1	2	3	4	5
Задержка доставки пакета <i>IP, IPTD</i>	(Прим. 1)	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	Н
Вариация задержки пакета <i>IP, IPDV</i>	(Прим.2)	50 мс (Прим.3)	50 мс (Прим.3)	Н	Н	Н	Н
Коэффициент потери пакета <i>IP, IPLR</i>	(Прим.4)	$1 \times 10^{-3}$	Н				
Коэффициент ошибок пакетов <i>IP, IPER</i>	(Прим. 5)	$1 \times 10^{-3}$	Н				

Примечания:

1. Довольно длительное время прохождения в конечном итоге приводит к невыполнению требований низкой сквозной задержки. В ряде случаев требования к *IPTD* для классов 0 и 2 не могут быть выполнены. Все Провайдеры услуг связи сталкиваются с такими обстоятельствами, поэтому диапазон значений требований к *IPTD* разделен на несколько альтернативных классов *QoS*. Требования к значению задержки для каждого из этих классов не запрещаются поставщиками сетевых услуг, а предлагаются в соглашениях, где оговариваются, например, меньшие значения задержки. В соответствии с определением параметра задержки *IPTD* в рекомендации *ITU-T Y.1540* время доставки пакета включено в требование к *IPTD*.

При оценке этих требований предполагалось, что максимальный размер информационного поля пакета составляет 1500 байт.

2. Определение требования к параметру *IPDV* (приведенного в рекомендации *ITU-T Y.1540*) представляет собой двухточечную вариацию задержки *IP* пакета. В рекомендации *МСЭ-Т Y.1540* и Дополнении II приведена более подробной информации о сущности этого требования. Для целей планирования ограничение значения задержки *IPTD* может быть получено из верхнего ограничения минимального значения задержки *IPTD*; поэтому ограничение для 0,999 квантиля можно получить путем добавления значения *IPTD* и значения *IPDV* (например, 150 мс для класса 0).

3. Значение задержки зависит от пропускной способности каналов связи. Изменение задержки в сторону уменьшения возможно, если значения пропускных способностей каналов выше, чем основная скорость (*T1* или *E1*) или размер пакетов меньше, чем 1500 байт.

4. Требования для трафика классов 0 и 1 в части параметра *IPLR* основаны на исследованиях, показывающих, что установленное значение  $10^{-3}$  не окажет существенного влияния на приложения передачи речи и речевые кодеки.

5. Установленное значение предполагает, что основной причиной ошибок являются потери пакетов и что указанное значение показателя допустимо при передаче пакетов с использованием *IP* протоколов по сети с асинхронным режимом доставки [67].

Требования, приведенные в таблице 1.1, применимы к *IP* сетям общего пользования при анализе участков сети между двумя точками измерения (контрольными точками), которые определяют границы сквозной *IP* сети. При применении данных норм предполагается, что требуемые значения могут быть обеспечены в обычных реализациях *IP* сетей.

В первом столбце таблицы 1.1 приведен перечень статистических рабочих характеристик сети, требования к которым приведены в следующих столбцах таблицы.

Требования к рабочей характеристике для задержки доставки *IP* пакета являются верхней допустимой границей для значения *IPTD* в потоке множества пакетов.

Отдельные пакеты потока могут быть доставлены с задержкой, превышающей приведенное ограничение, но среднее значение задержки *IPTD* в течение времени существования (наблюдения) потока (статистическая оценка значения) должно быть не более, чем определенное в таблице 1.1 значение.

Требования к рабочим характеристикам для изменения задержки пакета *IP* [88] между двумя контрольными точками основаны на верхней границе 0,999 квантиля от распределения значения задержки (*IPTD*) для потока пакетов. Использование 0,999 квантиля позволяет выбрать относительно короткие интервалы оценки (например, для получения этой оценки минимально допустимым является интервал времени, в течение которого передано 1000 пакетов). Это позволяет обеспечить гибкость модели сети при проектировании буферов управления задержкой и длиной очереди в маршрутизаторах, для которой должно обеспечиваться выполнение требования к значению *IPLR*, не более  $10^{-3}$ . Использование меньших значений квантиля может привести к недооценке размера буфера деджитерризации. При этом реальные потери пакетов могут превысить требование к *IPLR* (например, при ограничении на уровне квантиля 0,99 коэффициент потерь пакетов может составить 1,1% при норме  $IPLR = 10^{-3}$ ).

Требования к рабочим характеристикам для коэффициента потерь *IP* пакетов являются верхней границей потерь пакетов *IP* для потока. Отдельные пакеты в потоке могут быть потеряны при передаче; за короткий интервал времени потери могут превысить норматив, но вероятность того, что любой отдельный пакет будет потерян во время передачи в потока, должна быть не более чем установленное ограничение, приведенное в таблице 1.1.

Требования для менее распространенных параметров процесса передачи пакетов оставлены на будущее рассмотрение. Например, процент побочных пакетов, определенный в Рекомендации *ITU-T Y.1540*.

Оценка приведенных в таблице 1.1 требований выполняется в результате проведения измерений, т.е. не мгновенно, а в течение некоторого времени. В течение интервалов оценки формируется подмножества совокупности полезных пакетов

(определено в Рекомендации *ITU-T Y.1540*). Желательно, чтобы интервалы оценки (измерения) были:

- достаточно продолжительными и позволяли получить необходимое количество пакетов исследуемого потока с учетом реальной скорости передачи данных;
- достаточно продолжительными, чтобы отражать период характерного использования (время существования потока битов) для данной услуги.
- достаточно короткими для обеспечения разумного баланса применяемых рабочих характеристик на протяжении каждого интервала (интервалы плохих рабочих характеристик не должны быть скрыты в слишком длинном оценочном интервале, они должны быть идентифицированы).
- достаточно короткими для обращения к фактическим аспектам измерения.

Для выполнения оценок, связанных с телефонией, минимальный интервал должен быть в диапазоне 10–20 секунд со скоростью передачи пакетов от 50 до 100 в секунду; верхнее ограничение интервала должно быть в пределах нескольких минут. Предполагаемое (ориентировочное) значение равно одной минуте. В любом случае используемое значение интервала измерения должно быть записано наряду с измеряемым значением с любыми предполагаемыми и доверительными интервалами. Любой отрезок времени в одну минуту должен удовлетворять требованиям *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*, которые описаны в таблице 1.1.

Статические соглашения для класса *QoS* могут быть разработаны путем цепки маркировочных пакетов (например, старшие биты типа обслуживания или кодовый указатель на дифференцированные услуги) к определенному классу обслуживания. Протоколы, которые обозначены для поддержки динамических запросов *QoS* между пользователями и Провайдерами сетевых услуг, а также между самими Провайдерами сетевых услуг, до настоящего времени, подлежат, по мнению МСЭ, изучению. При разработке этих протоколы и системы поддержки, у пользователей и сети операторов будет возможность запрашивать и получать разные классы *QoS* на уровне потоков. В связи с этим, определенные технические характеристики, необхо-

димые для разных служб и приложений, можно будет их объединить, оценить и принять для решения задач эксплуатации [5].

### **1.2.2. Канал передачи данных для классов *QoS* через интерфейс *UNI-UNI***

Пакет в каждом потоке, как правило, следует определенным путем. Любой поток, который удовлетворяет соответствующим требованиям технических характеристик, может рассматриваться как полностью удовлетворяющий нормативам, установленным в рекомендации *ITU-T Y.1541*.

Будем называть трафик, обслуживаемый сетью связи между интерфейсами пользователя с сетью (пользователь-сеть), "сквозным" трафиком. Требования к техническим характеристикам между интерфейсами пользователь-сеть определены для показателей протокола *IP* в соответствии с эталонными событиями передачи пакета *IP*. Эти требования в протоколе *IP* для интерфейсов *UNI-UNI* применяются на участке от конечного интерфейса пользователь-сеть до интерфейса пользователь-сеть на другом конце участка (Рисунок 1.2). Пусть маршрут между этими двумя интерфейсами пользователь-сеть проходит через несколько сетевых сегментов (*NS – Network Segment*) и межсетевых каналов, которые обеспечивают передачу пакетов *IP* от *UNI* интерфейса на стороне отправителя (*SRC*) к интерфейсу *UNI* на другом конце получателя (*DST*). Протоколы нижележащих уровней, охватывают уровни *IP* от уровня 1 до уровня 3, согласно модели взаимодействия открытых систем (ВОС) [45], они тоже считаются частью сети *IP*. Сетевые сегменты *NS* (определенные в Рекомендации *ITU-T Y.1540*) эквивалентны доменам операторов связи и могут включать сетевые архитектуры протокола *IP*, описанные в Рекомендации *ITU-T E.651* [94] и *Y.1231* [89]. Канал передачи данных, представленный на рисунке 1.2, является адаптационной моделью рабочих характеристик из рекомендации *ITU-T Y.1540*.

Оборудование потребителя включает в свой состав окончное оборудование (*terminal equipment – TE*), например, хост и какой-либо маршрутизатор или, если имеется, локальная вычислительная сеть (ЛВС). Предполагается наличие только одного пользователя в нескольких приложениях.

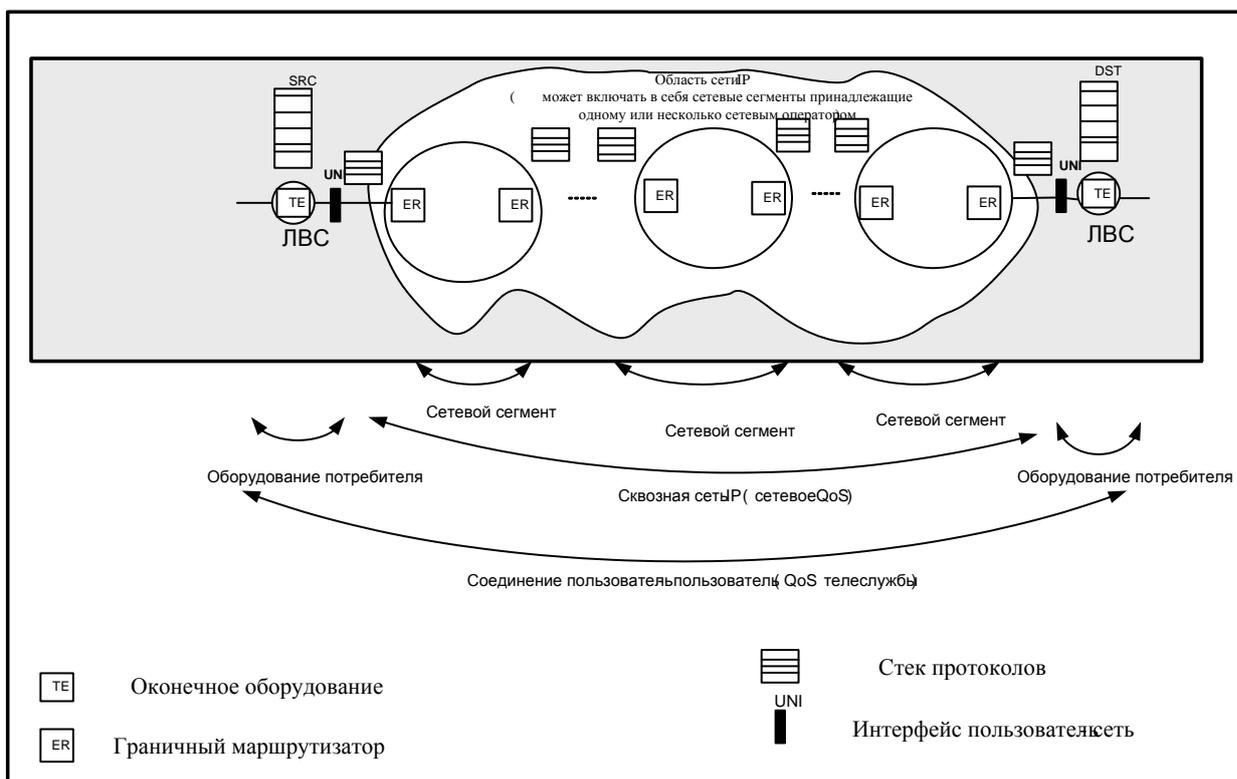


Рисунок 1.2 - Канал передачи данных UNI-UNI для требований к сетевому QoS

Соединенные с окончательным оборудованием граничные маршрутизаторы должны также выполнять функции шлюзов доступа. Эталонные каналы имеют следующие характеристики (атрибуты):

1) IP сеть может обеспечивать соединения пользователь-пользователь, пользователь-хост и другие варианты конечных точек соединения.

2) Сетевые сегменты могут быть представлены как области сети между граничными маршрутизаторами и неопределенным количеством внутренних маршрутизаторов, выполняющих различные функции.

3) Количество сетевых сегментов в заданном пути может зависеть от предлагаемого класса обслуживания наряду с учетом топологии и географической протяженностью каждого сегмента сети.

4) Сфера применения Рекомендации Y.1541 допускает использование на маршруте одного или нескольких сетевых сегментов.

5) Сетевые сегменты, поддерживающие передачу пакетов в потоке битов, могут изменяться во время его существования.

б) Возможность соединения по протоколу *IP* распространяется за границы международной сети, но не следует идентичным соглашениям о коммутации каналов (например, на международной границе могут отсутствовать идентифицируемые шлюзы).

### 1.2.3. Классы сетевого *QoS*

В данном разделе рассматриваются определенные (в настоящее время) классы качества обслуживания трафика. Каждый такой класс имеет определенную комбинацию ограничений для значений рабочих характеристик. В таблице были 1.1 приведены правила, указывающие возможность использования каждого из классов обслуживания трафика. Эти правила не накладывают ограничений на выбор какого-либо конкретного класса обслуживания в заранее заданном окружении.

Требования к качеству обслуживания применяются к сетям *IP* общего пользования. Предполагается, что требования *QoS* могут быть достижимы на обычных реализациях сети *IP*. Обязательство Поставщика сетевых услуг перед пользователем заключается в доставке пакетов таким способом, который обеспечивает соблюдение всех примененных требований.

подавляющее большинство каналов *IP* с заявленным соответствием рекомендации *ITU-T Y.1541* должно удовлетворять этим требованиям. Для некоторых параметров рабочие характеристики на коротких и/или несложных маршрутах могут быть значительно лучше, определенных в требованиях значений.

Оценка параметров в сети связи производится по данным, получаемым в результате измерений (наблюдений). При этом точность получаемых оценок зависит от числа наблюдений и от продолжительности интервала наблюдений. Для параметров *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* предполагается интервал времени для получения оценки, равный одной минуте. В любом случае должны быть зарегистрированы как измеряемое значение, так и продолжительность интервала наблюдения. Любой отрезок времени за одну минуту должен удовлетворять заданным требованиям. Отдельные Поставщики услуг связи могут предлагать соглашения с лучшими значениями сетевых характеристик, чем те, которые предусмотрены общими требованиями.

В общем случае, сеанс связи можно представить состоящим из трех фаз – установления соединения, передачи информации и завершения соединения. В рекомендации *ITU-T Y.1540* рассматривается только фаза сеанса связи – фаза доставки *IP* пакетов. Этот подход отражает природу сетей *IP*, не ориентированных на установление соединений. Показатели качества обслуживания трафика на этапах установления и завершения соединения, а также принципы их декомпозиции приведены, например, в рекомендациях *ITU-T Q.543* [80], *E.802* [83], *Y.1560* [93], *E.721* [98], *E.651* [94].

В рекомендации *ITU-T Y.1540* определены следующие параметры, которые характеризуют процесс доставки *IP*-пакетов:

Задержка доставки пакета *IP* (*IP packet transfer delay, IPTD*). Параметр *IPTD* определяется как интервал времени, необходимый для доставки пакета между источником и получателем для всех пакетов – как успешно переданных, так и для пакетов, доставленных с ошибками.

Вариация задержки доставки пакета *IP* (*IP packet delay variation, IPDV*). Вариация задержки доставки пакета *IP*, или джиттер, проявляется в том, что последовательные пакеты прибывают к получателю в случайные моменты времени.

Коэффициент потерь пакетов *IP* (*IP packet loss ratio, IPLR*). Коэффициент потерь *IPLR* определяется как отношение числа потерянных пакетов к общему числу пакетов в выбранном наборе переданных и принятых пакетов.

Коэффициент *IP* пакетов с ошибками (*IP packet error ratio, IPER*). Коэффициент *IPER* определяется как число пакетов, принятых с ошибками, к сумме успешно принятых пакетов и пакетов, принятых с ошибками. Величина *IPER* определяет ту часть параметра *IPLR*, которая обусловлена потерями пакетов из-за искажений. По этой причине величину *IPER* нет смысла исследовать с точки зрения ее последующей декомпозиции.

Также в рекомендации *ITU-T Y.1541* определены численные значения параметров, которые должны выполняться в сетях *IP* на международных маршрутах, соединяющих терминалы пользователей. Нормы на параметры качества разделены по

различным классам обслуживания *QoS*, которые определены в зависимости от приложений и сетевых механизмов [51, 102], применяемых для их обеспечения.

Одной из базовых услуг сетей связи является услуга телефонной связи, поэтому рассмотрим основные принципы ее реализации. Среди основных принципов построения и развития сетей телефонной связи целесообразно выделить три аспекта, прямо или косвенно относящихся к тем вопросам, которые рассматриваются в диссертационной работе:

- структура сети на всех уровнях иерархии;
- показатели качества обслуживания трафика передачи речи;
- услуги, предоставляемые абонентам.

Модель телефонной сети, которая предложена МСЭ в рекомендациях серии *Y*, приведена на рисунке 1.3. Данная модель является универсальной для сетей связи любого вида, в том числе и сети *NGN*.

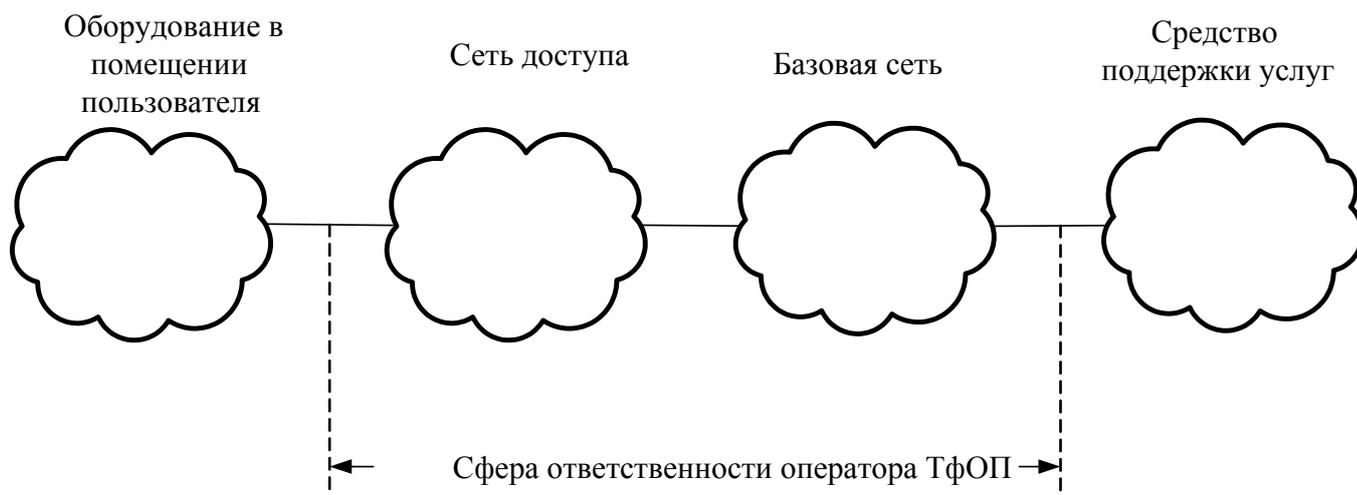


Рисунок 1.3 - Модель телефонной сети, предложенная МСЭ

В базовой модели сети (*core network*), принято условно выделять четыре фрагмента – Рисунок 1.3. Эти фрагменты образуют верхние уровни иерархии ТфОП. Нижним уровнем является сеть доступа (*access network*). Строго говоря, сеть доступа это неотъемлемая часть любой местной телефонной сети. Ее выделение в виде отдельного "облака" объясняется рядом важных свойств сети доступа.

"Облако" под названием "Внутризоновая сеть" изображено на рисунке 1.4 пунктирной линией. Фрагмент ТфОП с таким названием выделяется только в российской ТфОП.

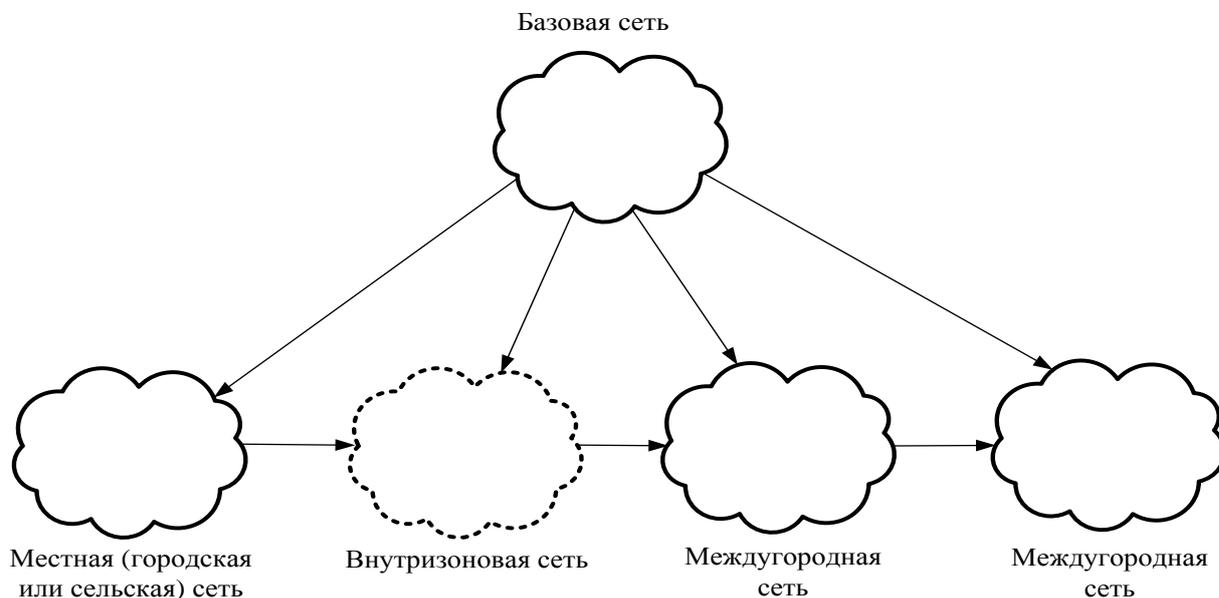


Рисунок 1.4 - Четыре фрагмента базовой сети

Рисунки 1.3 и 1.4 позволяют рассматривать ТфОП как иерархическую систему. В городских и сельских телефонных сетях можно выделить свои уровни иерархии, когда данная необходимость возникает в процессе решения каких-либо задач. Существует также второй способ представления модели ТфОП, основанный на выделении двух уровней сети. Эти уровни имеют место во всех четырех фрагментах, которые изображены на рисунке 1.4, а также в сети доступа. Первый уровень представляет собой транспортную сеть (*transport network или transmission network*), которая обеспечивает формирование каналов связи и трактов передачи данных для связи коммутационных станций ТфОП между собой. Вторым уровнем – коммутируемая сеть (*switched network*). Задача коммутируемой сети заключается в установлении соединений между телефонными аппаратами (ТА) абонентов.

Некоторые нормативные документы Администрации связи России используют и другую терминологию. Транспортная сеть в них имеет название первичной сети, а коммутируемая сеть является вторичной. Определения "первичная" и "вторичная" сети были впервые введены российскими специалистами, которые предложили де-

композицию сети связи на два уровня [19, 64]. Существенно позднее аналогичная декомпозиция была предложена в ряде рекомендаций МСЭ. В материалах МСЭ приняты термины "*transport network*" и "*switched network*". Эти определения предпочтительны по двум причинам. Во-первых, эти термины в большей степени отражают функции, выполняемые транспортной и коммутируемой сетями. Во-вторых, соответствие терминов на русском и английском языках упрощает процессы описания и исследования, разработки и эксплуатации оборудования электросвязи. На рисунке 1.5 приведена зависимость качества восприятия услуги телефонной связи, приведенная как оценка по *R*-фактору [93] для различных комбинаций параметров *QoS*.

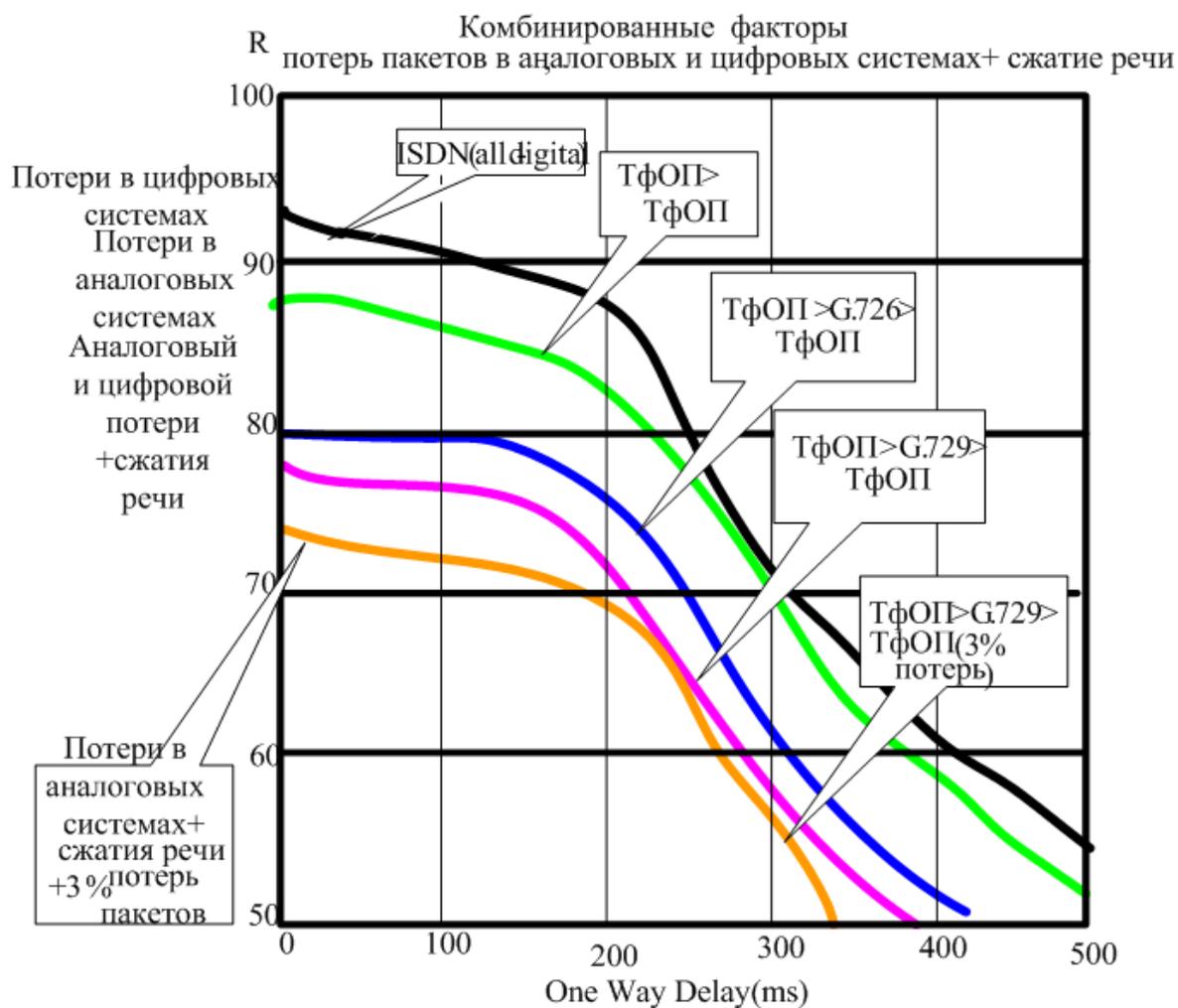


Рисунок 1.5 - Зависимость *QoE* от задержки и потерь

*R-Factor* – способ оценки качества звука по балльной шкале от 0 до 120 и он отличается от сокращенной шкалы *MOS* (1-5) тем, что он более точен для оценки

показателя качества. *R-Factor* учитывает ощущения пользователей и объективные факторы, влияющие на общее качество *VoIP*-системы.

Рисунок 1.5 иллюстрирует эффект последовательного соединения не идеальных факторов (потери в цифровых и аналоговых системах).

Показатели *IPTD* и *IPDV* определены для *IP* сети, которая, в принципе, может иметь физическую протяженность вплоть до 27500 км [82]. При таком расстоянии распространение сигнала со скоростью света происходит за время около 90 мс. По коаксиальным кабелям и оптическим волокнам время распространения сигнала составляет от 4 до 5 микросекунд на километр. Это означает, что расстояние в 27500 км сигнал преодолет за 110 – 137,5 мс. Очевидно, что для нулевого и второго классов *QoS* нормы, приведенные в таблице 1.1, в случае сети максимальной протяженности не будут обеспечиваться. Качество восприятия услуг телефонии в наибольшей степени зависит от совокупности сетевых параметров, *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* пакетов.

Из рисунка 1.5 видно, что оценка качества существенно зависит также от типа применяемого кодека, т.е. способа преобразования акустического сигнала в поток пакетов и обратно. Начало резкого снижения *QoE* для различного типа кодеков наблюдается при величине задержки около 150 мс. При этом коэффициент потерь составляет 3%. Таким образом, можно определить величину задержки 150 мс, и величину коэффициента потерь 3%, как максимально допустимые [96].

В одном из дополнений к рекомендации МСЭ Y.1541 [91] приведен пример структуры разговорного тракта для связи двух терминалов. Эта структура приведена на рисунке 1.6. Основой для данной иллюстрации служит семиуровневая модель ВОС [82].

На стороне говорящего абонента задержка *IP* пакета (до момента его передачи в сеть) может составлять до 20 мс. На стороне слушающего абонента в буфере джиттера пакет может ожидать до 60 мс. Это означает, что даже без учета времени доставки в *IP* сети, суммарная задержка речевого сигнала составит 80 мс.

В технической литературе приводятся и другие значения постоянной задержки *IP* пакетов на обоих концах сети. Тем не менее, именно значения, приведенные в до-

полнении к рекомендации Y.1541, следует считать перспективными. Данное утверждение связано с двумя аспектами.



Рисунок 1.6 - Структура разговорного тракта в IP сети

Во-первых, ожидаемые требования к качеству передачи речи будут соответствовать уровню, к которому привыкли абоненты, пользуясь услугами ТфОП. В ряде случаев абоненты будут готовы заплатить за более высокое качество речи, которое *ETSI* (Европейский институт телекоммуникационных стандартов) отнес к широкополосному классу [71]. К этому следует добавить еще один важный фактор – постоянное снижение стоимости транспортных ресурсов [2, 67], из которых в *NGN* для телефонной связи будет достаточно несколько процентов от суммарной пропускной способности. Во-вторых, увеличение размера буфера джиттера (и, следовательно, суммарной задержки) существенно снижает влияние разброса времени получения IP пакетов на качество телефонной связи.

Подобные соображения позволяют сделать очевидный вывод: время пребывания IP пакетов в сети должно быть минимальным. Это означает, что пропускная способность трактов должна быть весьма высокой. В качестве систем распределения информации *NGN* следует использовать высокопроизводительные аппаратно-программные средства. В [71, 72, 87] содержатся указания, которые подтверждают подобные соображения. В частности, среди тех ресурсов, которые могут использоваться для обмена IP пакетами, предпочтение отдается трактам *Ethernet*.

Если принять задержки, приведенные на рисунке 1.6, в качестве норм для сети *NGN*, то несложно вычислить допустимую задержку в *IP* сети (в СеМО). "Остаток" от *IPTD* ( $D_0$ ), который для нулевого класса обслуживания равен 20 мс, нужно "распределить" между следующими фрагментами сети [88, 87]:

- шлюз доступа (*access gateway*);
- шлюз межсетевого взаимодействия (*internetworking gateway*);
- местная сеть (*distribution*);
- базовая сеть (*core*).

Для соединений в границах одной *IP* сети шлюз межсетевого взаимодействия не нужен. Он предназначен для организации связи между сетями, созданными разными операторами связи.

Оценки, приведенные в [91] и в других документах, а также результаты измерений трафика позволяют установить долю вносимой задержки для каждого фрагмента *IP* сети. Соответствующие величины далее обозначены как  $w_i$ . Сумма всех слагаемых  $w_i$  равна единице. В частности, в сети без шлюза *internetworking gateway* можно получить такое распределение [54]:

- сеть доступа –  $w_1 \approx 60\%$  ;
- местная (городская или сельская) сеть –  $w_2 \approx 20\%$  ;
- базовая сеть (междугородная и международная) –  $w_3 \approx 20\%$  .

Характер распределения объясняется следующим. В базовой сети применяются высокопроизводительные маршрутизаторы и транспортные ресурсы с высокой пропускной способностью. Поэтому вклад задержки этой сети, которая – для большинства соединений – включает значительное число маршрутизаторов, оценивается в 20%. Следует отметить, что данное распределение касается величины задержки вносимой временем обработки, ожидания и доставки пакетов. При учете времени распространения сигнала распределение может быть иным из-за существенной величины времени распространения сигнала на маршрутах с большой протяженностью (или спутниковых каналах связи). Относительно высокая доля допустимой задержки в сети доступа объясняется большим объемом логических операций, выпол-

няемых в соответствующем шлюзе. Также следует учесть, что величины, которые предложены для коэффициентов  $w_i$ , целесообразно рассматривать как предварительные оценки. Они будут уточняться по мере накопления опыта построения сети *NGN*. Подобные соображения позволяют осуществить декомпозицию норм на показатели качества обслуживания для IP сети. Задача декомпозиции заключается в том, чтобы определить нормативные значения параметров *QoS* для основных фрагментов IP–сети.

### 1.3. Подходы к декомпозиции показателей *QoS*

В настоящее время в [84] разработана только одна группа методов декомпозиции показателей *QoS*. Входящие в эту группу методы названы статическими. В тексте рекомендации *ITU-T Y.1542* перечисляются и другие методы декомпозиции показателей *QoS*, но они оставлены для дальнейшего изучения. Среди них следует выделить упомянутый выше метод стоимостных предложений (*Costed Bids Method*), который может быть основан на рекомендациях *ITU-T* серии "D", посвященных вопросам тарификации и взаимных расчетов. В частности, в рекомендации *ITU-T D.271* [78] рассматриваются основные аспекты начисления платы за услуги, предоставляемые *NGN*. Соображения, приведенные в [78], полезны для разработки метода стоимостных предложений, а также для уточнения ряда положений текущей версии рекомендации *ITU-T Y.1542*. Для проведения необходимых исследований задачу декомпозиции показателей *QoS* целесообразно рассматривать как процедуру управления запасами [48].

В рекомендации *Y.1542* предложена модель, которая подразумевает участие сетей трех поставщиков (операторов связи) в организации маршрута между двумя интерфейсами пользователь-сеть. Эта модель показана на рисунке 1.7. Интерфейсы пользователь-сеть обозначены аббревиатурой *UNI (User-Network Interface)*. В ряде случаев в пределах сети каждого оператора связи также необходимо провести процедуру декомпозиции перечисленных выше показателей *QoS* по отдельным фрагментам каждой сети. Подобная операция может потребоваться для оценки исполь-

зубаемых или планируемых к применению ресурсов с точки зрения соблюдения показателей  $QoS$ .

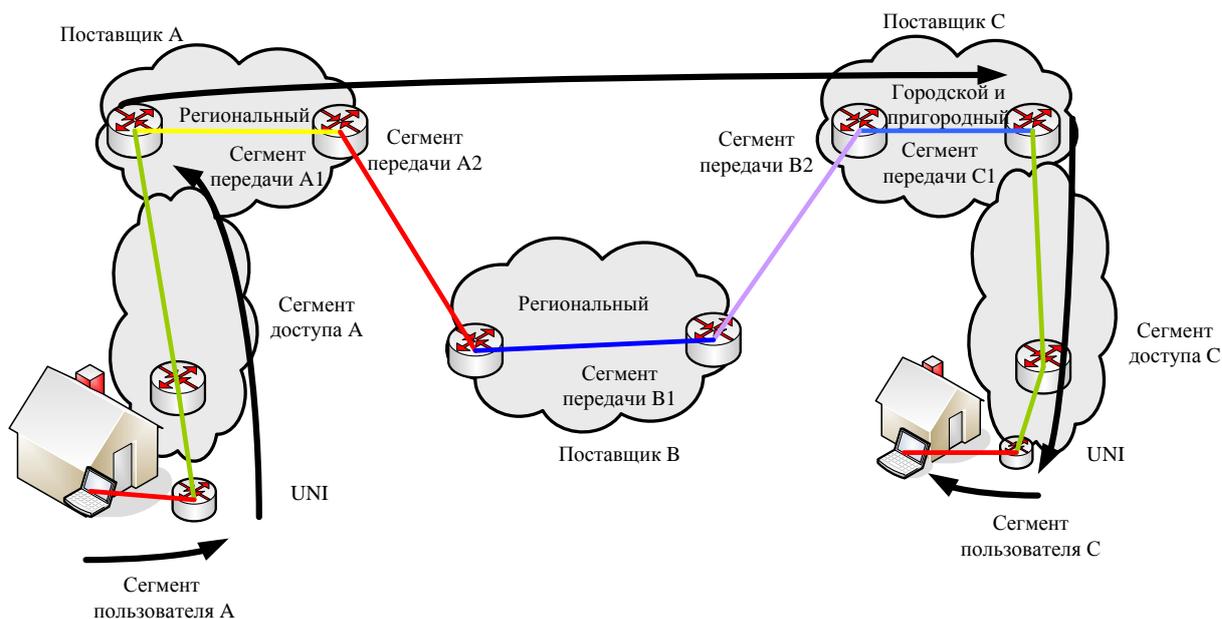


Рисунок 1.7 - Маршрут обмена  $IP$ -пакетами между интерфейсами пользователь-сеть

Статический метод, детально проработанный в рекомендации  $ITU-T Y.1542$ , позволяет провести декомпозицию показателей  $QoS$  как по сетям отдельных операторов связи, так и по отдельным фрагментам этих сетей в границах ответственности каждого оператора связи. Недостатком статического метода является невозможность учета реальных возможностей оборудования передачи и коммутации, задействованных разными операторами связи. В результате могут возникать ситуации, которые представлены следующим примером:

- сеть оператора связи "А" не обеспечивает выполнения  $QoS$ , которые определены для него статическим методом и он вынужден модернизировать свою сеть;
- ресурсы оператора связи "В" таковы, что гарантируют именно те показатели  $QoS$ , которые вычислены статическим методом;
- сеть оператора связи "С", благодаря избыточным ресурсам, поддерживает более высокие показатели  $QoS$ , чем определенные для него статическим методом;
- даже без какой-либо модернизации сети оператора "А" между интерфейсами пользователь-сеть обеспечиваются все установленные показатели  $QoS$ .

Очевидно, что в подобных ситуациях следует использовать иной способ декомпозиции показателей  $QoS$ . В частности, интересен подход, относящийся к методу стоимостных предложений. Точное определение такого подхода еще не сформулировано. Поэтому предлагаемый подход назван адаптивным методом декомпозиции показателей  $QoS$ .

Следует подчеркнуть, что "облако", служащее моделью поставщика "B", может включать несколько сетей разных операторов. Кроме того, каждая из сетей будет включать разное количество маршрутизаторов и шлюзов. Для анализа показателей  $QoS$  детализация количества элементов модели может быть различной, что определяется постановкой задачи. По этой причине маршрут обмена  $IP$ -пакетами между двумя (одними и теми же) интерфейсами  $UNI$  может содержать разное количество элементов математической модели.

Основная идея рассматриваемого ниже метода декомпозиции состоит в определении показателей  $QoS$  для сетей, и для фрагментов этих сетей с учетом потенциальных возможностей используемых узлов коммутации и маршрутов обмена  $IP$ -пакетами. С точки зрения теории управления запасами показатели  $IPTD$  и  $IPDV$ , выражаемые в единицах времени, по определению, относятся к невозполняемым ресурсам [48]. Это положение можно распространить и на показатель  $IPLR$ .

Суть адаптивного метода декомпозиции проще всего проиллюстрировать на примере показателя  $IPTD$ . Пусть значения  $IPTD_A$ ,  $IPTD_B$  и  $IPTD_C$  представляют собой значения средней задержка передачи  $IP$ -пакетов в трех сетях. Эти величины получены методом статического распределения на основе эталонного тракта, который предложен в [84]. Очевидно, что сумма  $IPTD_A$ ,  $IPTD_B$  и  $IPTD_C$  равна нормированному значению  $IPTD$ .

Адаптивный метод предполагает модификацию этих слагаемых, которая может быть выражена через коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно, как показано на рисунке 1.8. При этом соблюдается условие равенства трех новых слагаемых значению  $IPTD$ .

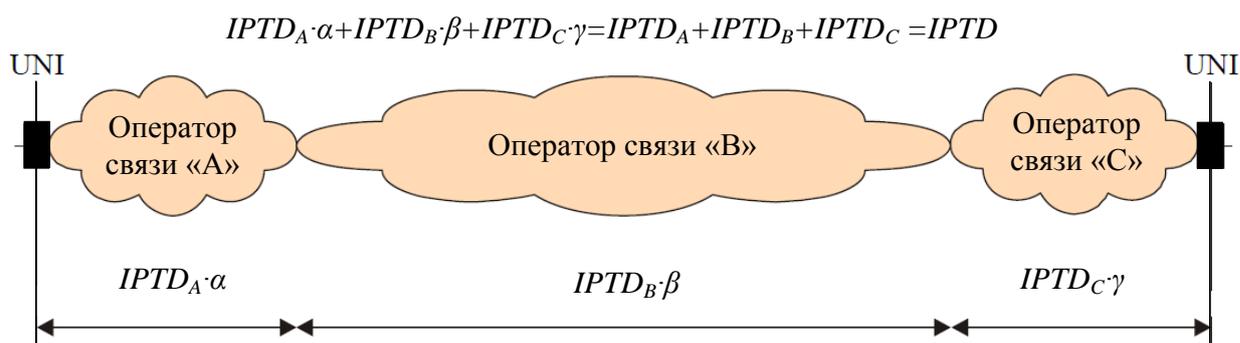


Рисунок 1.8 - Результат декомпозиции показателя *IPTD* адаптивным методом

#### 1.4. Анализ результатов исследований в части декомпозиции показателей *QoS*

Декомпозиция показателей *QoS* применяется уже в течение длительного времени, т.е. начиная с момента появления требований к качеству предоставления услуг связи. В период существования гомогенной ТфОП действовали нормативные отраслевые документы (нормы технологического проектирования НТП 112-2000) [76], регламентирующие показатели качества для различных уровней данной сети, а именно местной, зоновой и междугородной сетей связи. Кроме того, в рекомендациях МСЭ-Т рассматривалась не только вероятность потерь вызовов, но и затухание, показатели ошибок, частота проскальзывания. В качестве важного показателя для ТфОП выступала величина вероятности потерь вызовов. Принципы декомпозиции, в этом случае, основывались на технических возможностях оборудования, которое было однородно как по своим возможностям, так и по составу у различных операторов связи.

Принцип декомпозиции осуществлялся для обслуживания потоков нагрузки в сетях связи таким образом, что необходимо было определить вероятности потерь и/или задержек в последовательно соединенных отдельно управляемых подсистемах связи. Для пояснения система связи состоящей из следующих друг за другом разделено управляемых подсистем.

Следует различить три типа систем, состоящих из двух подсистем:

- две подсистемы с явными потерями;
- одна подсистема с потерями и одна с ожиданием;

- две подсистемы с ожиданием.

С помощью этих трех типов систем выполнялось требование к качеству обслуживания. В системах с явными потерями ухудшение качества обслуживания происходит только из-за блокировок, и поэтому для характеристики качества обслуживания поступающих потоков достаточно указать лишь одно число – вероятность потери вызова [65].

В системах связи, состоящих из следующих друг за другом подсистем с потерями и подсистемы с ожиданием, вычисляется вероятность потерь и задержек; их вычисление не является сложной задачей. Если нагрузка поступает сначала на подсистему с потерями и вероятность потерь равна  $BI$ , то  $(1 - BI)$  всех вызовов поступит на подсистему с ожиданием. Если последняя представляет собой систему с неограниченной очередью, то вызовы в ней не теряются и общая вероятность потерь равна  $B = BI$ . В системах связи с комбинированной дисциплиной обслуживания вычисляется вероятность общих потерь и задержек для двух систем с ожиданием таких, что вызовы, поступающие на каждую из систем, могут также теряться [65].

Развитие технологий связи привело как к росту возможностей по реализации различных услуг, так и к изменению набора показателей качества. Наряду с этим, сети различных операторов связи могут иметь различный состав оборудования разной производительности и пропускной способности. Поэтому, задача декомпозиции показателей качества в современной сети должна решаться не только с позиции формального перераспределения нормативных значений по участкам сети, но и с учетом возможностей обслуживания, а также с учетом интересов операторов связи, которые могут отличаться в существенной степени.

В настоящее время вопрос декомпозиции показателей качества обслуживания для сети следующего поколения освещен недостаточно полно, однако принцип декомпозиции качества обслуживания применяется в ряде работ, например, таких как создание баз данных и организации *Web*-сервисов [99, 101]. В частности, в работе [54] поставлена задача декомпозиции показателей *QoS*. В документах *ITU-T* [84, 91] задачи декомпозиции решается частично для показателя *IPTD*.

Можно сформулировать ряд требований к методу декомпозиции показателей качества в современных сетях связи. Метод декомпозиции должен обеспечивать:

1. декомпозицию достаточно полного набора показателей качества;
2. распределение показателей качества должно быть основано на моделях, адекватно описывающих функционирование сетей связи;
3. распределение показателей качества должно учитывать особенности сетей связи и интересы операторов связи.

В работе [17] приводится анализ требований к показателям качества услуг телефонной связи для различных видов соединений. Этот анализ можно рассматривать как декомпозицию показателей качества услуги на различные уровни сети связи.

В работе [13] приводится перечень показателей качества и методов их оценки на различных уровнях сетей связи.

Рекомендации *ITU-T* [91] предлагают метод декомпозиции величины задержки доставки пакета данных (*IPTD*), на основе данных о структуре сетей связи операторов, взаимодействующих при предоставлении услуги. Предлагаемый метод декомпозиции учитывает лишь особенности сетей связи, оставляя без внимания модели функционирования и интересы операторов.

Следует также учесть, что Мининформсвязи приказом № 113 от 27.09.2007 года ввел "Требования к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования". Эти нормы в настоящее время обязательны для сети связи общего пользования Российской Федерации.

В работе [54] предлагается декомпозиция показателей качества обслуживания в *NGN*, которые установлены между терминалами пользователей. Это позволяет сформулировать требования к тем показателям качества обслуживания, которым должны отвечать фрагменты сети и их основные элементы (оборудование коммутации и маршрутизации).

Анализ перечисленных источников показал, что в настоящее время не существует общепринятых методов декомпозиции для полного набора показателей качест-

ва обслуживания с учетом интересов операторами, взаимодействующими при предоставлении услуг связи.

В данной диссертационной работе предлагается метод декомпозиции, учитывающий реально складывающиеся ситуации с точки зрения выполнения норм на показатели *QoS* каждым оператором связи. Применение этого метода, названного адаптивным, позволит минимизировать затраты операторов связи на модернизацию своих сетей.

## **Выводы**

1. Одной из задач построения сетей связи класса *NGN* является поддержка нормированных показателей качества предоставления услуг связи. Она может быть обеспечена путем контроля параметров качества обслуживания трафика *QoS* в сети с пакетной коммутацией.

2. В качестве показателей качества обслуживания трафика в сети *NGN* выступают параметры, в наибольшей степени влияющие на качество предоставления услуг. К ним относятся параметры, характеризующие скорость и достоверность доставки данных (пакетов), определенные рекомендациями *ITU-T* как *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*.

3. Обеспечение качества предоставления услуг в сети *NGN* достигается нормированием данных параметров на маршруте доставки данных, в качестве которого определен маршрут между пользовательскими интерфейсами (*UNI-UNI*). Нормативные значения параметров *QoS* определены в рекомендациях *ITU-T* для различных классов обслуживания трафика.

4. В общем случае, маршрут пропуска трафика *UNI-UNI* проходит через сети нескольких операторов связи. Поэтому задача обеспечения качества предоставления услуги решается при взаимодействии сетей всех операторов, принимающих участие в обслуживании трафика. Для решения данной задачи требуется декомпозиция показателей качества (нормативных значений) на участки маршрута *UNI-UNI* в зонах ответственности каждого из операторов связи.

5. В настоящее время в материалах *ITU-T* описан лишь один из вариантов решения задачи декомпозиции показателя *IPTD*. Задача декомпозиции показателей *IPLR* и *IPDV* в настоящее время не имеет определенного решения. Также следует отметить, что описанный метод декомпозиции *IPTD* не учитывает особенностей и интересов операторов связи.

6. Таким образом, разработка метода декомпозиции показателей качества является актуальной. Ее решение с учетом интересов операторов связи позволит оптимизировать взаимоотношения между операторами связи и избежать излишних расходов на переоборудование сетей, обеспечивая при этом нормированные требования к качеству обслуживания мультисервисного трафика.

## Глава 2

### 2. Декомпозиция показателей *IPTD* и *IPLR*

#### 2.1. Математическая модель маршрута обмена *IP*-пакетами

Сети связи следующего поколения, как уже было отмечено в первой главе, обслуживают мультисервисный трафик (услуги передачи речи, видео и данных), который представляет собой поток пакетов, проходящий через интерфейс пользователь сеть (ИПС) от конечного пользователя (отправителя) к конечному пользователю (получателю). Поток пакетов проходит через один или несколько узлов коммутации. Чтобы трафик был доставлен конечному пользователю, эти узлы функционируют как многофазная система обслуживания (СМО). Случайные процессы возникновения и обслуживания трафика в такой системе наиболее точно описывают модели телетрафика. Маршрут доставки данных в сети следует изучать как многофазную СМО [22, 25, 28].

В общем случае каждый из узлов этой системы функционирует как СМО с дисциплиной обслуживания с ожиданием, а точнее с комбинированной дисциплиной обслуживания – с ожиданием и с потерями. В современных мультисервисных сетях трафик (пакеты данных) принято дифференцировать по классам обслуживания, в зависимости от конкретных требований к качеству для той услуги, которая произвела пакет. Поэтому, для описания такой системы целесообразно использовать модели СМО с ожиданием, с ожиданием и потерями, а также с приоритетным обслуживанием [22, 58]. Не все узлы коммутации *IP*-пакетов поддерживают обслуживание с приоритетами. В связи с этим анализ ВВХ (вероятностно-временных характеристик) в *NGN* разумно осуществлять для двух дисциплин обслуживания заявок: с приоритетами и без приоритетов. В последнем случае дисциплина выбора заявок из очереди определяется правилом *FIFO* (*First in first out*) [25, 27]: первым пришел – первым обслужен.

Во всех случаях пакеты передаются по общему маршруту, то есть каждую СМО можно считать однолинейной – с одним обслуживающим прибором. Для описания функционирования такой системы необходимо определить три основные

группы характеристик: входящего потока заявок, процесса их обслуживания и дисциплины обслуживания. На рисунке 2.1 представлена модель маршрута обмена информацией в сети NGN.

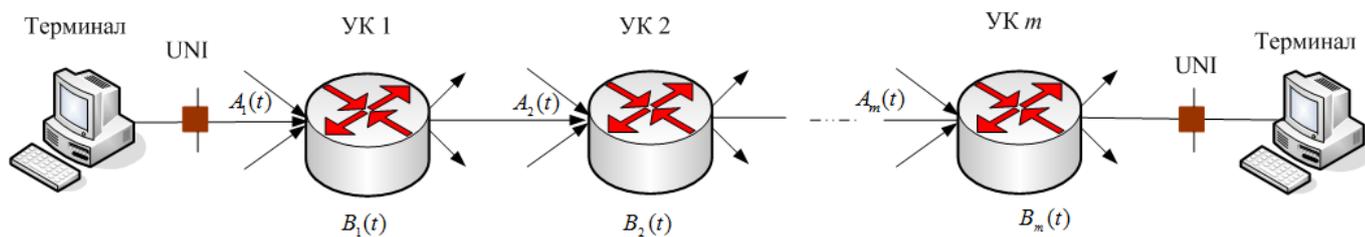


Рисунок 2.1 - Модель маршрута обмена информацией в сети NGN

Математическая модель рассматриваемого маршрута в общем случае содержит  $n$  СМО. Область изменения этой величины определяется неравенством вида  $1 < n \leq m$ . Значения количества СМО  $n < m$  соответствуют случаю, когда состав сети каких-либо операторов связи не раскрывается или его детализация не имеет практического смысла. Как правило, характеристики потока включают в себя описание распределения вероятности поступления заявок или интервалов времени между заявками и их параметры. Характеристики процесса обслуживания включают в себя распределение времени обслуживания и его параметры. Дисциплина обслуживания предполагает наличие (или отсутствие) мест ожидания, их количество, порядок выбора из очереди, наличие приоритетов.

При построении или эксплуатации сети связи решаются задачи выбора необходимого объема ресурсов, т.е. характеристик и параметров системы обслуживания при заданных характеристиках потока и требованиях к качеству обслуживания. Или анализируются характеристики качества обслуживания трафика при заданных свойствах потока и процесса обслуживания [34].

Наиболее существенное влияние на качество предоставления услуг связи в современных сетях имеют вероятностно-временные характеристики, отражающие скорость доставки пакета между ИПС или на участке маршрута. Как было показано выше эти характеристики выражаются через параметры  $IPTD$ ,  $IPLR$  и  $IPDV$ , определенные в рекомендациях  $ITU-T$  Y.1540, Y.1541 [84, 88].

В рекомендации Y.1541 параметр *IPTD* определен как средняя величина (математическое ожидание) задержки доставки пакета данных. Параметр *IPLR* определен как величина вероятности потери пакетов через количество  $n$  сетевых сегментов. Параметр *IPDV* определен как разница между задержкой 99,9% пакетов и их минимальной задержкой.

Если  $f(x)$  плотность вероятности времени нахождения пакета в СМО, то величина *IPTD* может быть получена как математическое ожидание (2.1):

$$IPTD = \int_0^{\infty} xf(x)dx, \quad (2.1)$$

где  $f(x)$  – плотность вероятности времени задержки. Величина *IPDV* может быть получена из выражения (2.2):

$$IPDV = \arg(F(x) = 0,999) - T_{\min}, \quad (2.2)$$

где  $T_{\min}$  – минимально возможная величина задержки.

Из теории телетрафика известны аналитические модели СМО, которые наиболее часто используются для описания процессов обслуживания трафика в сети:  $M/M/1$ ,  $M/D/1$ ,  $G/G/1$ . Предположим, что модель узла связи может быть представлена как СМО с ожиданием и одним обслуживающим устройством. В общем случае время обслуживания пакета в узле определяется суммой времени передачи по каналу связи (которое определяется скоростью передачи и длиной пакета) и временем обработки пакета (анализ заголовка, процесс выбора маршрута и другие операции). Будем полагать, что время передачи пакета также будет постоянным.

Использование аналитических моделей дает потенциальную возможность получить более точную оценку времени задержки *IPTD* и джиттера *IPDV*, по сравнению с методом, предлагаемым в Y.1541. Однако свойства реальных потоков в сети связи могут существенно отличаться от свойств простейшего потока [31, 32, 60]. Это приводит к тому, что оценки, полученные с использованием точных аналитических выражений для СМО  $M/M/1$  и  $M/D/1$ , будут отличаться от реальных значений параметров. Оценить эту ошибку можно использованием имитационного моделирования.

При проектировании сетей связи, как правило, отсутствуют данные о характере абонентского трафика и обслуживающих его сетевых элементов. Поэтому на этапе проектирования сети невозможно с достаточной уверенностью определить, какую именно аналитическую модель следует выбрать для оценки параметров качества функционирования. При этом часто прибегают к практическим оценкам качества обслуживания после частичного построения сети, и корректируют проект в соответствии с полученными результатами, либо применяют в проекте решения, использовавшиеся в ранее реализованных проектах. Несмотря на возможность практического решения задачи обеспечения качества обслуживания, использование адекватных аналитических моделей может в значительной степени упростить работы по проектированию и реализации сетевых решений из-за уменьшения объема последующих коррекций.

Практически любая аналитическая модель дает возможность получения оценок, являющихся лишь приблизительными оценками реально функционирующей телекоммуникационной системы. При выборе той или иной аналитической модели важно иметь представление о величине этой ошибки. Поэтому имеет смысл сравнить результаты использования упрощенных моделей СМО в различных условиях и оценить потенциально возможные ошибки. На основании полученных результатов можно рекомендовать применение той или иной модели, в зависимости от конкретных задач.

Существует два основных состояния сети связи. Первое состояние, когда сеть работает в стационарном режиме, то есть без перегрузок; в этом случае целесообразно следовать рекомендации Y.1542. Если на каком-то участке сеть сильно перегружена, а на других участках сети есть свободные ресурсы, то возможно заранее определить: на каком из участков допустить чуть больше задержку или потери, а на каком участке их компенсировать. Это возможно реализовать технически. С точки зрения экономики этот вариант рассматривается в четвертой главе.

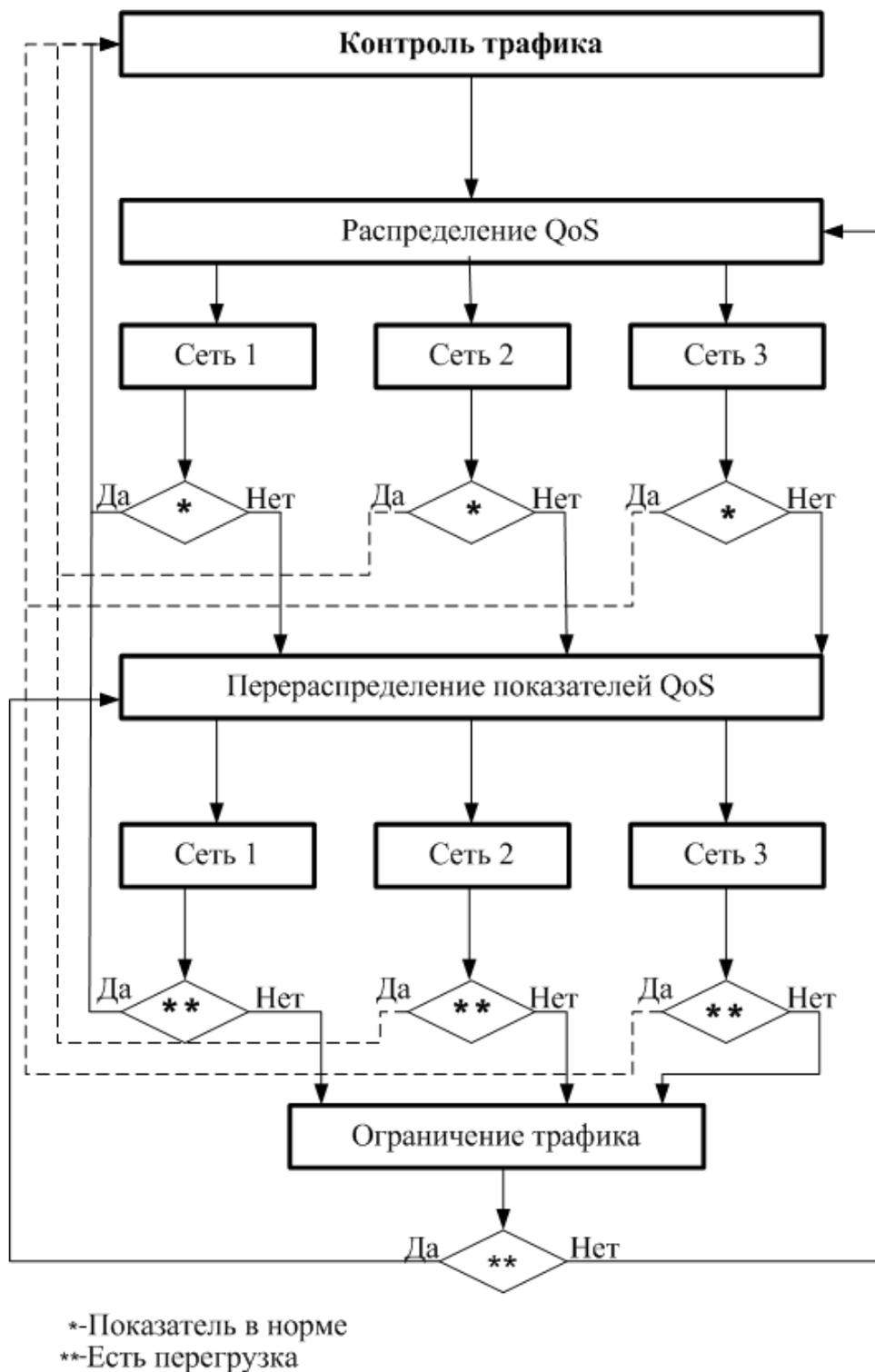


Рисунок 2.2 - Алгоритм перераспределения показателей *QoS*

Второе состояние, когда сеть начинает перегружаться. Тогда необходимо обеспечить максимально возможное высокое качество обслуживания. В этой ситуации нужно распределить ресурсы с учетом реальной перегрузки, потому что участок сети с большим объемом ресурсов может быть загружен в больше степени, чем уча-

сток с меньшим объемом ресурсов. Далее нужно обращаться в центр управления сети для того чтобы ограничить трафик. Здесь речь идет о механизмах ограничения нагрузки, которые не рассматриваются в диссертационной работе. Алгоритм перераспределения показателей  $QoS$  приведен на рисунке 2.2.

## 2.2. Аналитическое исследование средней задержки $IP$ -пакетов

### 2.2.1. Модели на основе простейших СМО

В теории телетрафика модель  $M/M/1$  представляет собой систему с возможностью формирования очереди бесконечной длины, с одним сервером (обслуживающим прибором), где входящий поток определяется как простейший, а время работы обслуживающего устройства имеет экспоненциальное распределение [27]. Модель является самой простой СМО и привлекательна для исследования, так как дает возможность получения аналитических выражений для многих метрик. Хотя реальные сетевые элементы, практически всегда, отличаются от данной модели, во многих практических случаях ее применение оправдано, так как позволяет получить вполне достаточную точность оценки параметров. Модель используется, в основном, для выявления ряда общих закономерностей, касающихся изменения показателей  $QoS$ .

Поступающие заявки обслуживаются одним устройством. Время обслуживания случайно и распределено по экспоненциальному закону со средним значением  $\mu^{-1}$ . В [27] показано, что плотность времени ожидания в системе распределено по экспоненциальному закону:

$$w(t) = \mu(1 - \rho) \cdot e^{-\mu(1-\rho)t}, \quad (2.3)$$

где  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  – интенсивность нагрузки (Эрл);

$\mu = \frac{1}{B^{(1)}}$  – интенсивность обслуживания пакетов, определяемая через среднее

время обслуживания  $B^{(1)}$ ;

$\lambda$  – интенсивность потока (пакетов/с).

Пример функции плотности вероятности времени обслуживания для системы  $M/M/1$  показан на рисунке 2.3.

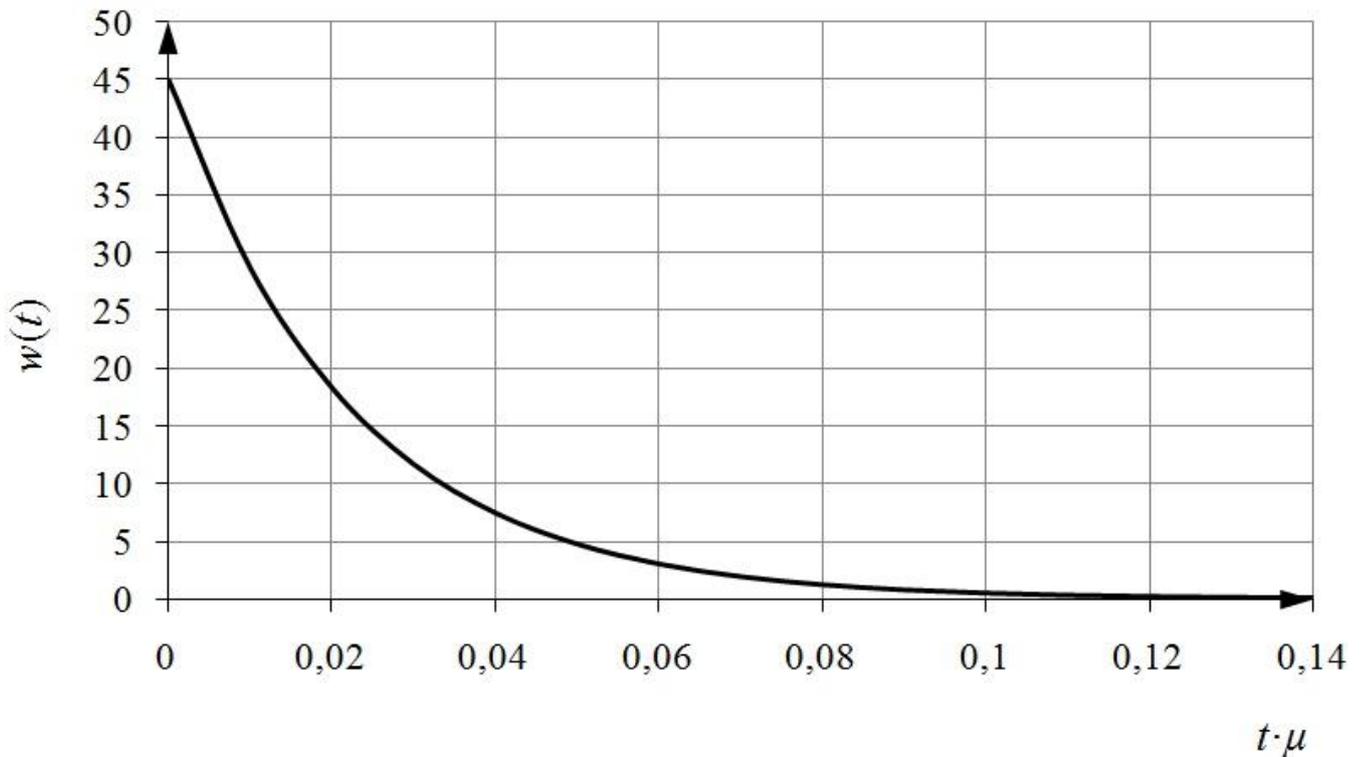


Рисунок 2.3 - Пример функции плотности вероятности времени обслуживания для системы  $M/M/1$  (при  $\rho=0,1$ )

Среднее время задержки заявок в рассматриваемой системе можно представить в следующем виде [27]:

$$S^{(1)} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1 - \rho}. \quad (2.4)$$

Также рассмотрим модель вида  $M/D/1$ , которая отличается от системы  $M/M/1$  тем, что время работы обслуживающего устройства постоянно. Модель также считается сравнительно простой системой. Данную модель удобно использовать тогда, когда время обслуживания пакета в узле определяется только временем его обработки, которое зависит лишь от производительности устройства обработки (процессора) и не зависит от других факторов.

Функция распределения вероятности времени ожидания начала обслуживания определяется следующей формулой [55]:

$$W(t) = (1 - \rho) \sum_{k=0}^{\lfloor \mu t \rfloor} \frac{\left[ \lambda \left( \frac{k}{t} - t \right) \right]^k}{k!} e^{-\lambda \left( t - \frac{k}{\mu} \right)}, \quad (2.5)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока (пакетов/с);

$\mu = \frac{1}{B^{(1)}}$  – интенсивность обслуживания пакетов;

знак  $\lfloor \cdot \rfloor$  указывает на то, что от результата деления берется целое значение.

Вид функции приведен на рисунке 2.4.

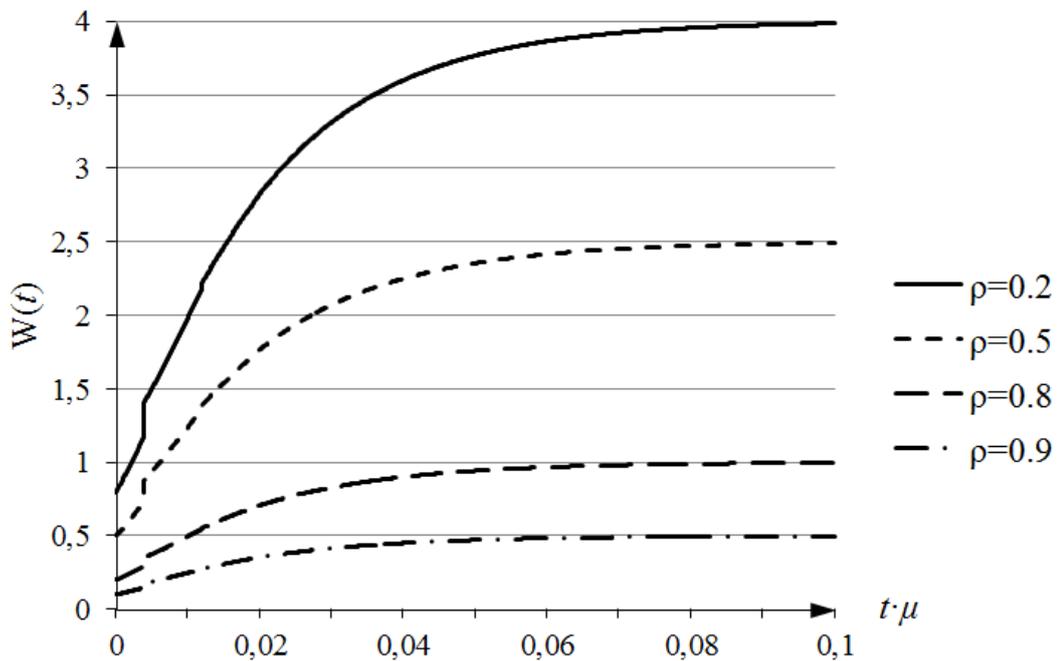


Рисунок 2.4 - Функция плотности вероятности времени ожидания начала обслуживания в системе  $M/D/1$  для нагрузок 0,2; 0,5 и 0,8 Эрл

Среднее время задержки определяется таким образом [27]:

$$S^{(1)} = \frac{2 - \rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)}. \quad (2.6)$$

В отличие от системы  $M/M/1$  поток на выходе системы  $M/D/1$  не будет простейшим. Поэтому последовательное включение таких систем не имеет простого аналитического описания. Важным свойством системы  $M/M/1$  является то, что поток на ее выходе тоже является простейшим – теорема Берке [69] Следовательно, при

тандемном включении нескольких таких систем, их можно рассматривать как независимые СМО, пример последовательности СМО показан на рисунке 2.5.

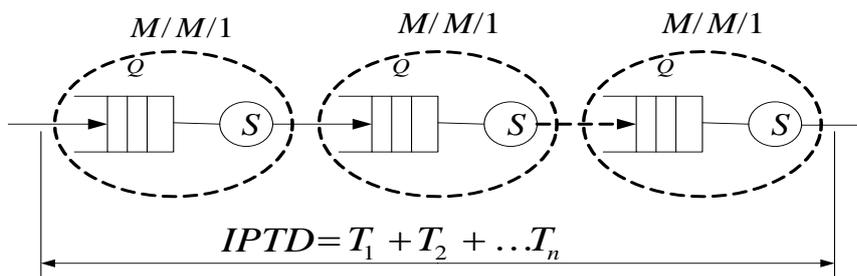


Рисунок 2.5 - Последовательность СМО

Известно [27], что для последовательного включения систем  $M/M/1$  может быть получена функция плотности вероятности времени обслуживания (всеми системами), которая представляет собой распределение Эрланга (2.7). Ее примеры показаны на рисунке 2.6.

$$S(m, t) = 1 - e^{-(1-\rho)\mu t} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{[(1-\rho)\mu t]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \quad (2.7)$$

Функция плотности вероятности этого распределения приведена на рисунке 2.7.

При анализе сложных систем массового обслуживания целесообразно рассматривать возможность применения модели  $M/M/1$ , так как ее использование позволяет существенно упростить результирующую модель.

### 2.2.1. Модель на основе системы массового обслуживания $G/G/1$

В теории массового обслуживания СМО вида  $G/G/1$  представляет собой систему с возможностью образования очереди бесконечной длины с одним сервером, где входящий поток определяется как произвольный поток независимых событий, а время работы обслуживающего устройства случайно и имеет произвольный закон распределения. Данная модель является почти универсальной. Однако точных аналитических соотношений для нее не существует. Для данной модели получены приближенные аналитические выражения для функции распределения вероятности времени обслуживания и верхней границы среднего времени обслуживания.

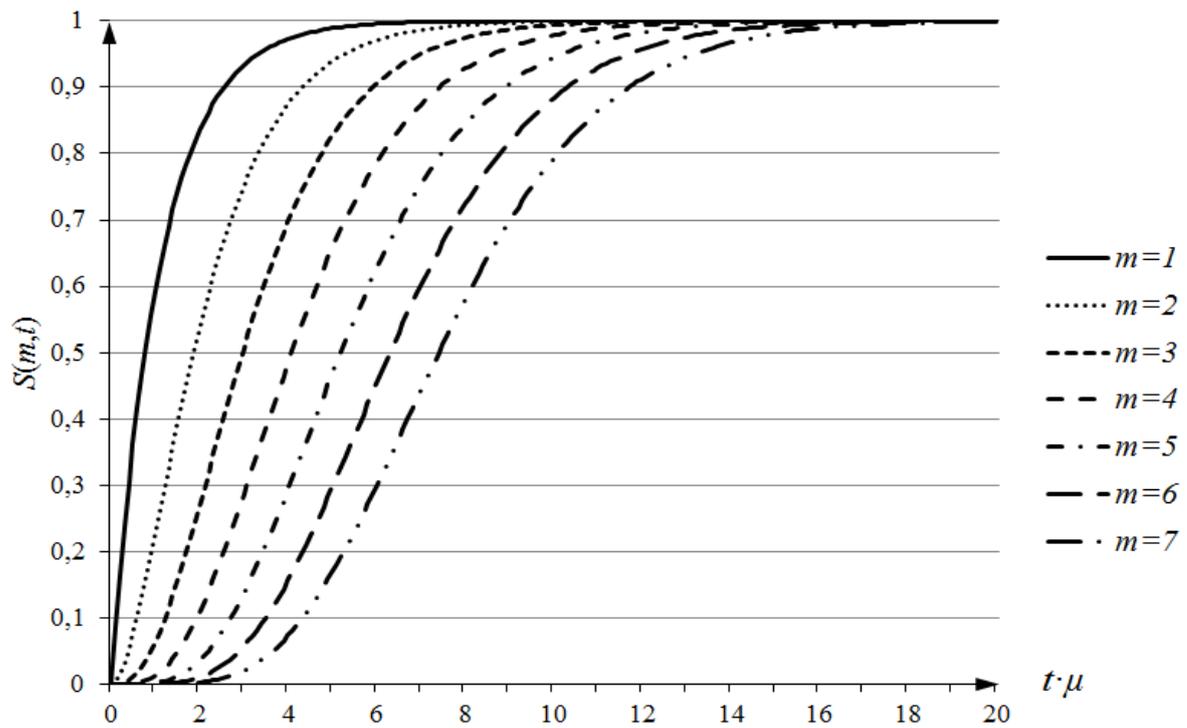


Рисунок 2.6 - Функция распределения времени обслуживания для различного числа фаз системы массового обслуживания ( $m=1, \dots, 7$ )

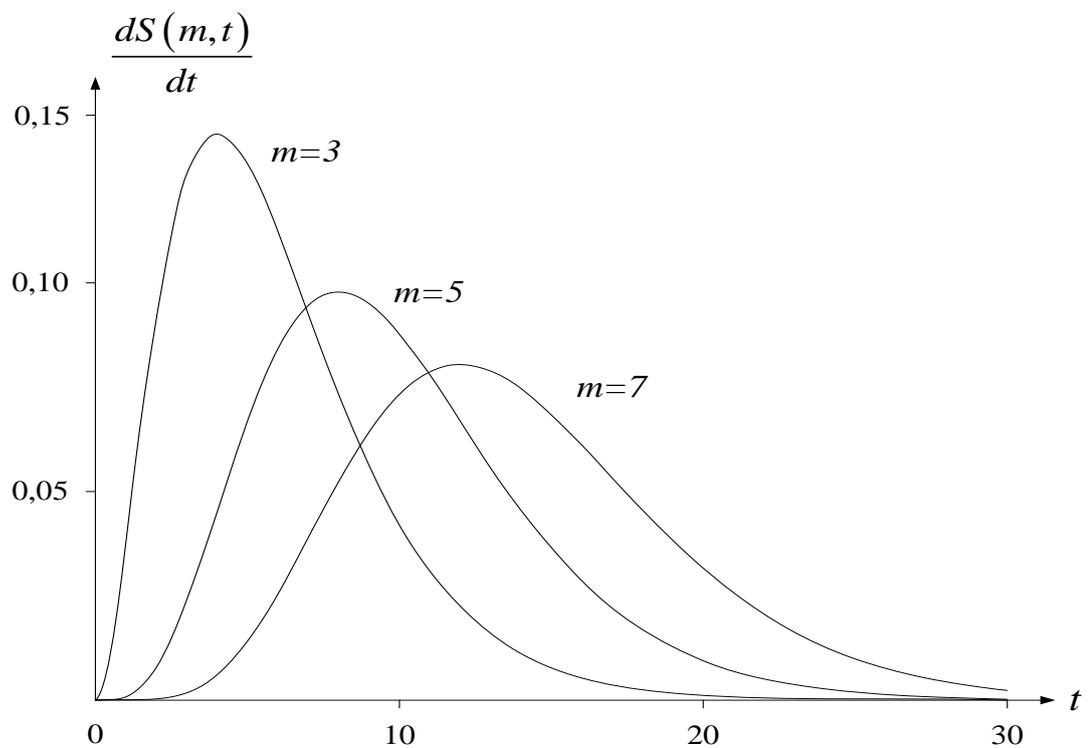


Рисунок 2.7 - Функции плотности вероятности времени задержки для последовательного соединения систем  $M/M/1$

В [27] показано, что функция распределения времени ожидания для СМО  $G/G/1$ , при высокой нагрузке имеет вид:

$$W(t) \approx 1 - \exp\left(-\frac{2B^{(1)}(1-\rho)}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}t\right), \quad (2.8)$$

где  $B^{(1)}$  – время обслуживания (с);

$\sigma_a$  – среднее квадратическое отклонение интервала времени между поступлениями пакетов;

$\sigma_b$  – среднее квадратическое отклонение времени обслуживания;

$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  – нагрузка (Эрл);

$\lambda$  – интенсивность поступления пакетов;

$\mu = \frac{1}{B^{(1)}}$  – интенсивность обслуживания пакетов.

Верхняя граница среднего времени ожидания (2.9) задана так [19]:

$$W \leq \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{2B^{(1)}(1-\rho)}. \quad (2.9)$$

Как видно из (2.8) и (2.9), функция распределения времени ожидания и верхняя граница среднего времени ожидания данной модели зависят от дисперсии интервалов времени между моментами поступления пакетов и дисперсии времени обслуживания. Таким образом, для ее использования требуется иметь данные о свойствах и параметрах входящего потока и процесса обслуживания.

Согласно аппроксимации Маршалла [27] среднее время ожидания равно:

$$W \approx \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}{2B^{(1)}(1-\rho)} \left( \frac{B^{(1)2} + \sigma_b^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right). \quad (2.10)$$

Согласно [24], оценка среднего числа пакетов в системе  $G/G/m$  может быть получена в таком виде:

$$\bar{q} = P(\rho, m) \frac{\rho}{1-\rho} \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} + m\rho, \quad (2.11)$$

где  $P(\rho, m)$  – вероятность того, что пакет, придя в систему, застанет все приборы занятыми. Параметр  $P(\rho, m)$  может быть рассчитан по приближенной второй формуле Эрланга [24]:

$$p(\rho, m) \approx m(1 - \rho) \frac{\rho^m}{1 - \rho^m}. \quad (2.12)$$

Средние значения времени ожидания в очереди  $W^{(1)}$  и задержки  $S^{(1)}$  в узле могут быть определены так [23]:

$$W^{(1)} = p(\rho, m) \frac{\rho}{1 - \rho} \frac{C_a^2 + C_b^2}{2}, \quad (2.13)$$

$$S^{(1)} = W^{(1)} + B^{(1)}, \quad (2.14)$$

где  $W^{(1)}$  – среднее время ожидания пакета в очереди, оцениваемое следующим образом:

$$W^{(1)} = p(\rho, m) \frac{B^{(1)}}{m(1 - \rho)} \frac{C_a^2 + C_b^2}{2}. \quad (2.15)$$

Таким образом, из (2.10), (2.11) и (2.15) видно, что задержка в узле представляет собой функцию от дисперсии или коэффициента вариации, т.е. зависит от закона распределения длин интервалов между пакетами и времени их обслуживания. Как видно из приведенных выражений задержка пакета тем меньше, чем меньше дисперсии этих величин.

### 2.2.2. Декомпозиция задержки на маршруте

Маршрут обмена пакетами между интерфейсами *UNI* включает несколько узлов коммутации (УК). С точки зрения модели это означает, что заявки (IP-пакеты) проходят несколько СМО, каждая из которых описывает процессы функционирования УК. В силу аддитивности математического ожидания [11] величина *IPTD* будет равна сумме средних значений задержки на маршруте. Это утверждение верно даже при существовании зависимости между процессами прохождения заявок через совокупность СМО.

С другой стороны, после каждой СМО часть заявок уходит с рассматриваемого маршрута, но на вход следующей СМО поступают заявки и с других направлений. Если предположить примерно соблюдающееся равенство количества заявок, покидающих маршрут и присоединяющихся от других направлений, то даже при равенстве величин интенсивности потоков возникает ошибка. Она обусловлена изменением характера суммарного входящего потока. По этой причине аддитивность математического ожидания становится приближенным соотношением.

При описании маршрута пропуска трафика используется многофазная СМО – рисунок 2.8. Задержка доставки пакета на участке *UNI-UNI* будет определяться как сумма задержек на каждой из фаз обслуживания.

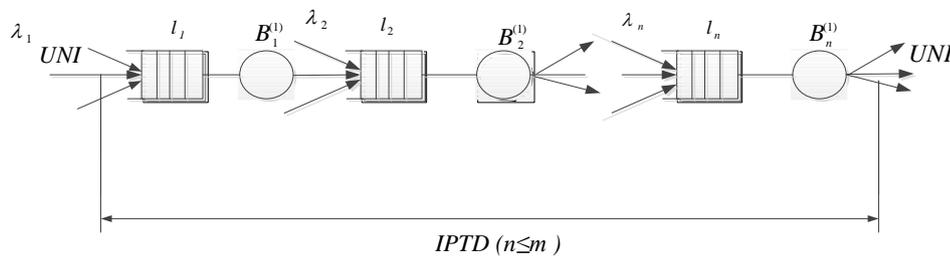


Рисунок 2.8 - Обслуживание сквозного потока многофазной СМО

Рассмотрим  $m$ -фазную СМО. Для величин времени задержки заявок –  $S_i$  и  $S_{i+1}$  справедлива некая зависимость  $S_{i+1} = F(S_i)$ , которой предлагается пренебречь. Это значит, что каждая  $i$ -я СМО анализируется как автономно функционирующая система входящие потоки без учета того, что уходящие и выходящие потоки меняют распределение  $A_i(t)$ . В этом случае величина  $IPTD$  оценивается суммой всех значений вида  $S_i$  для  $i = \overline{1, m}$ :

$$S^{(m)} \approx \sum_{i=1}^m S_i^{(1)}, \quad (2.16)$$

где  $S_i^{(1)}$  – средняя задержка заявок на  $i$ -й фазе.

Соотношение (2.16), с учетом существования функций  $S_{i+1} = F(S_i)$ , следует рассматривать как приближенную формулу. Корректность допущения  $S_{i+1} \neq F(S_i)$  проверяется методом имитационного моделирования.

Сделаем допущение, что данный маршрут состоит из  $m$  фаз, маршрут обслуживает пакеты данных, причем время обслуживания одного и того же пакета одинаково на всех фазах обслуживания, а маршрут обслуживает один единственный поток, поступающий на вход первой фазы. Тогда все заявки, поступающие на вход второй и последующих фаз, будут немедленно приниматься на обслуживание. Это приведет к тому, что функционирование первой фазы будет соответствовать модели, но на входе второй фазы длина очереди будет равна нулю, и применение приведенных аналитических моделей приведет к ошибочной оценке времени задержки. Данная ситуация возникает из-за корреляции между моментами поступления заявок и временем их обслуживания на входе второй фазы. В этом случае время доставки будет равно:

$$S^{(m)} = S_1^{(1)} + \sum_{i=2}^m B_i^{(1)}, \quad (2.17)$$

где  $B_i^{(1)}$  – время обслуживания пакета на  $i$ -й фазе обслуживания, кроме первой фазы;  
 $S_1^{(1)}$  – время задержки на первой фазе.

Данная ситуация изменяется, если на вход второй фазы поступает несколько потоков (не только поток, обслуженный на первой фазе) – Рисунок 2.9.

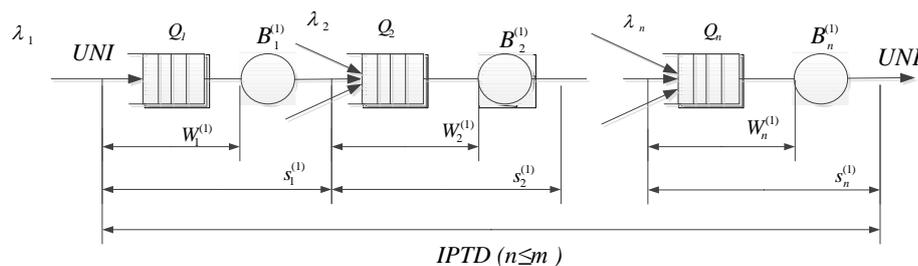


Рисунок 2.9 - Обслуживание нескольких потоков многофазной СМО

В этом случае степень зависимости моментов поступления пакетов на вход некоторой фазы обслуживания от времени их обслуживания на предыдущей фазе будет выражена в меньшей степени. Причем следует ожидать, что степень этой зависимости будет снижаться с уменьшением доли интенсивности "сквозного" трафи-

ка в интенсивности трафика на входах всех фаз обслуживания. В [4] подобные условия называются условиями применения аппроксимации Клейнрока.

Рассмотренный эффект зависимости достоверности модели описания задержки от организации маршрута обслуживания трафика имеет значение при декомпозиции величины *IPTD* между сетями различных операторов. Поэтому представляется весьма существенным исследование степени проявления этой зависимости от доли "сквозного" трафика. Аналитическое исследование данного эффекта весьма затруднительно, так как при рассмотрении зависимых фаз обслуживания придется учитывать как свойства реальных потоков трафика, так и распределение длин пакетов, которые в значительной степени отличаются от простейших аналитических моделей. Результаты данного исследования будут получены методом имитационного моделирования в разделе 2.4.

### **2.3. Аналитическое исследование вероятности потери IP-пакетов**

Потери пакетов в сети связи обусловлены физическими процессами, приводящими к ошибкам в канале, а также потерями в узлах сети. Процессы возникновения ошибок в каналах связи имеют различные свойства и специфичны для разных сред распространения и разных технологий (методов) передачи сигналов в линиях связи. Обычно, эти процессы рассматриваются на уровнях 1 и 2 модели ВОС и задачи, связанные с обеспечением требуемого уровня потерь, решаются при построении каналообразующей аппаратуры и линейных сооружений. На сетевом уровне первостепенное значение имеют потери пакетов, возникающие, в результате отказа в обслуживании пакета из-за переполнения буфера (возможно и из-за ограничения трафика) в узлах связи.

Вероятность потерь в узлах сети определяется интенсивностью трафика, числом мест ожидания (размером буфера), применяемой политикой обслуживания очередей и используемыми методами предотвращения перегрузки. В [24] для расчета потерь в системе вида  $G/G/1$  при известных распределениях, описывающих входной поток, предлагается использовать метод диффузионной аппроксимации:

$$P = \frac{1-\rho}{1-\rho \frac{2}{C_a^2+C_s^2}^{nb+1}} \rho^{\frac{2}{C_a^2+C_s^2}nb}, \quad (2.18)$$

где  $C_a^2$  и  $C_b^2$  – квадратичные коэффициенты вариации соответственно распределений входящего потока и времени обслуживания,  $nb$  – размер буфера,  $\rho$  – нагрузка системы. На рисунке 2.10 приведена зависимость вероятности потерь в СМО  $G/G/1/K$  от величины коэффициента вариации, для различного числа мест ожидания. При построении зависимости принято  $C_a = C_s = C$ .

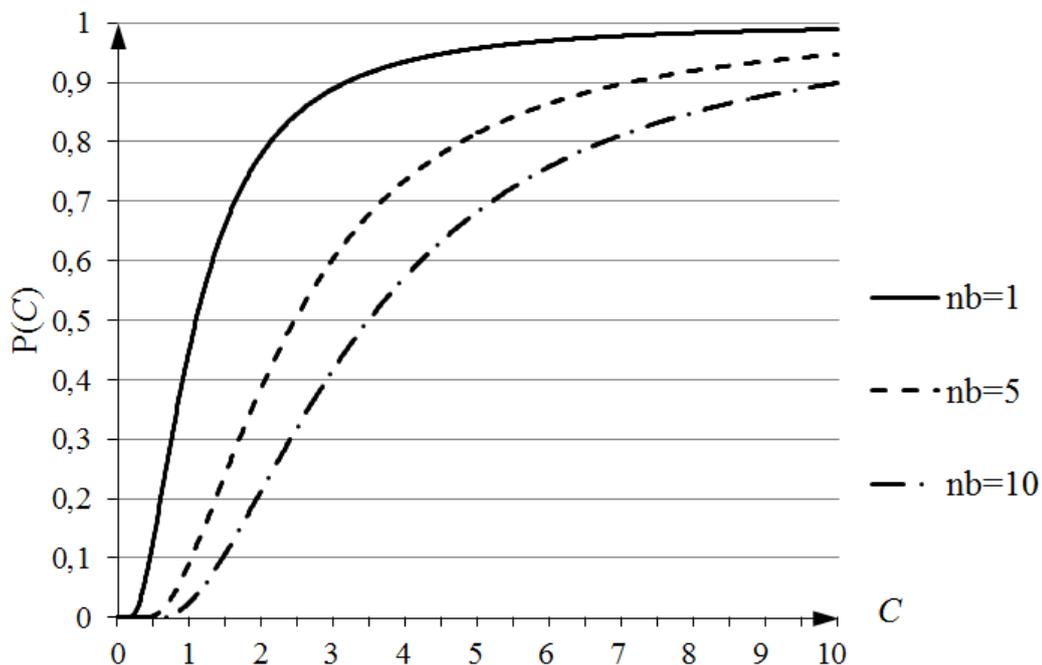


Рисунок 2.10 - Зависимость вероятности потерь от коэффициента вариации

Как видно из рисунка 2.10, вероятность потерь монотонно возрастает с ростом коэффициентов вариации потока и времени обслуживания. Наиболее благоприятным является случай, когда значения коэффициентов вариации минимальны, т.е. стремятся к нулю, что имеет место в случае регулярного потока и постоянного времени обслуживания. Законы распределения Парето являются наиболее часто встречающимся для длин протокольных блоков и для интервалов между их приходами. В случае, когда интервалы между протокольными блоками описываются логнормальным распределением, потери становятся достаточно велики (при нагрузке 0,5 дости-

гают 25%). Из изложенного можно сделать вывод, что для трафика, тяготеющего к логнормальному закону распределения, необходимо вводить дополнительные механизмы, регулирующие пачечность.

Вероятность потерь на маршруте (в многофазной СМО) будет определяться вероятностями потерь на каждой из фаз маршрута. Если предположить независимость потерь на каждой из фаз, то вероятность потерь на маршруте можно оценить так:

$$P_R \approx 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (2.19)$$

где  $P_i$  – вероятность потерь на  $i$ -й фазе обслуживания.

Вероятность потерь подвержена влиянию зависимости между фазами обслуживания. Рассматривая структуру маршрута, приведенную на рисунке 2.11 для единственного "сквозного" потока трафика, при равном времени обслуживания пакета на всех фазах, можно сделать аналогичные выводы о том, что потери пакетов в таком случае будут иметь место только на первой фазе обслуживания.

В этом случае, применение аналитической модели (2.18) допустимо только для первой фазы обслуживания. Длины очередей, следовательно, и потери пакетов на последующих  $(m-1)$  фазах будут равны нулю независимо от числа мест ожидания в соответствующих СМО.

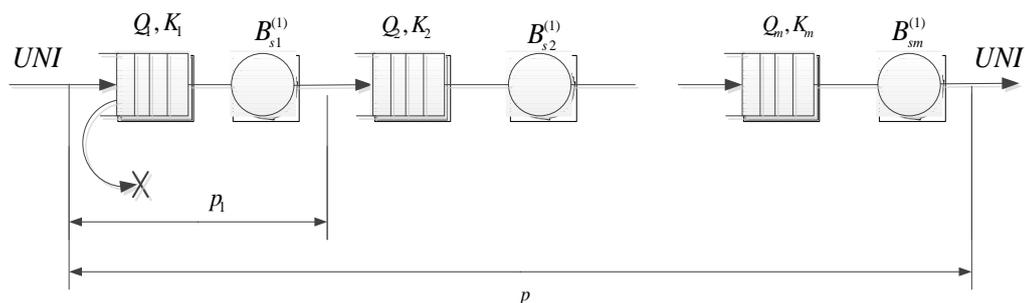


Рисунок 2.11 - Обслуживание "сквозного" потока многофазной СМО с потерями

Следует ожидать, что аналитическое описание маршрута, как последовательности независимых СМО, возможно только в случае, когда интенсивность "сквозно-

го" потока составляет незначительную долю от интенсивности трафика, поступающего на всех фазах обслуживания – Рисунок 2.12.

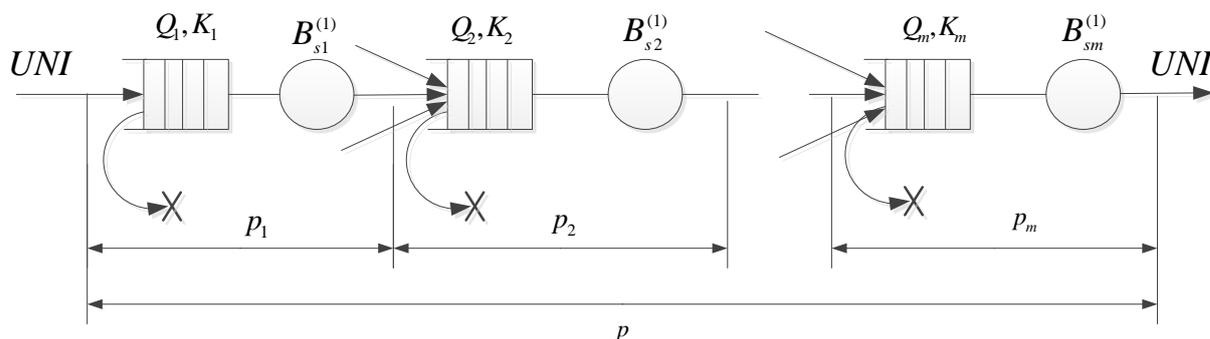


Рисунок 2.12 - Обслуживание агрегированных потоков многофазной СМО с потерями и с ожиданием

Предположим, что маршрут состоит из трех фаз обслуживания (сетей трех операторов связи), причем требуется произвести декомпозицию вероятности потерь между двумя из них.

$$P_R \approx 1 - (1 - \alpha P_1)(1 - \beta P_2)(1 - \gamma P_3), \quad (2.20)$$

где  $\alpha + \beta + \gamma = 3$  – коэффициенты, учитывающие вклад соответствующей фазы обслуживания (сети оператора связи) в общую величину вероятности потерь.

Предположим, что  $P_R$  – заданный норматив (константа), который обеспечивается при взаимодействии операторов связи (фаз обслуживания). При равном вкладе всех фаз обслуживания коэффициенты  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  в случае отклонения одного из значений вероятности потерь от исходного значения, коэффициенты должны быть изменены таким образом, чтобы обеспечить равенство нормативу вероятности на всем маршруте (2.20). При этом значение каждого из коэффициентов будет отражать вклад соответствующего оператора в обеспечение качества обслуживания.

Для задачи декомпозиции показателей качества представляет интерес характер зависимости между данными коэффициентами и вероятностью потерь. Данная зависимость приведена на рисунке 2.13.

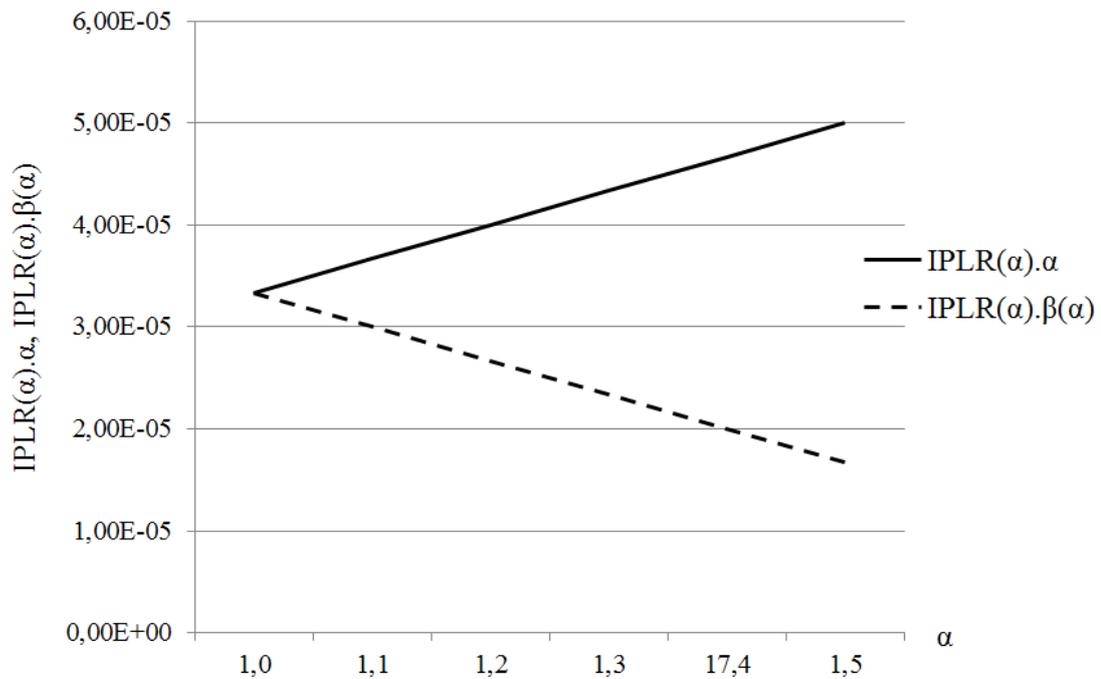


Рисунок 2.13 - Зависимость вклада потерь на одной из фаз при изменении вклада второй фазы

Характер зависимости, приведенной на данном рисунке, показывает, что при независимости фаз обслуживания изменение вклада в обеспечение качества обслуживания с достаточной степенью уверенности можно считать линейным. В случае зависимости между фазами обслуживания данное утверждение не применимо. Поэтому для оценки возможности применения линейной модели надо исследовать близкие к реальным моделям, учитывающие особенности обслуживаемого трафика и степень зависимости между фазами обслуживания. Для этого целесообразно использовать метод имитационного моделирования. Результаты анализ имитационного моделирования будут рассмотрены ниже.

## 2.4. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений

### 2.4.1. Выбор средств имитационного моделирования

Имитационное моделирование сетей связи является вариантом математического моделирования и производится с помощью аналитических и численных мето-

дов расчета [31]. При выполнении имитационного моделирования СМО необходимо реализовать модели входящего потока заявок и модель процесса обслуживания. Известно, что входящий поток заявок, как правило, представляет собой случайный процесс их поступления. Он может быть представлен как последовательность случайных чисел, представляющих собой моменты времени поступления заявок. Можно также задать поток интервалами времени между моментами поступления заявок. Для получения последовательности случайных чисел можно использовать различные способы. Существуют несколько основных способов получения случайных чисел:

- использование таблиц случайных чисел (табличные способы),
- измерение параметров случайных процессов (физические способы),
- вычислительные алгоритмы (алгоритмические способы).

Табличные способы подразумевают использование специальных таблиц случайных чисел, в которых приведены числа с заданным законом распределения.

При построении имитационной модели, предполагается, что имитируемый процесс длится бесконечно долго, а вероятность события не зависит от момента поступления заявки. В большинстве практических случаев это не так. Таким образом, чтобы исключить данную неточность модели, необходимо либо определять начальное состояние обслуживающих устройств модели, либо устранять из наблюдений влияние начального интервала моделирования исследуемого процесса.

Адекватность имитационной модели в значительной мере определяется качеством генерируемой последовательности случайных (псевдослучайных) чисел. Статистические характеристики имитируемой последовательности должны быть максимально близкие к характеристикам требуемой случайной последовательности. Схожесть свойств генерируемой последовательности необходима для обеспечения сходимости оценок среднего значения, дисперсии и функции распределения к теоретическим значениям.

Система имитационного моделирования, реализованная в виде некоторого программного обеспечения, обычно состоит из нескольких модулей (программ): управляющего модуля, модуля программ модели (процессов), модуля списка собы-

тий (очереди событий), счетчика модельного времени, модулей средств накопления статистических данных и средств их обработки и модуля интерфейса с пользователем. Модуль управляющей программы выполняет функции взаимодействия элементов системы имитационного моделирования и выполнение процессов взаимодействия остальных модулей. Очередь событий в виде таблицы, которая в общем случае, содержит несколько полей (столбцов), упорядоченная по времени событий.

На практике, модели, в основном, разрабатываются для исследования процессов, которые не поддаются теоретическому анализу или анализ которых слишком сложен. В частности, трафик в сети передачи данных значительно отличается от трафика в сети с коммутации каналов. Это является следствием использования дисциплины обслуживания с ожиданием и протоколов передачи данных.

Рассмотрим краткие характеристики некоторых прикладных систем имитационного моделирования:

*GPSS (General Purpose Simulation System)* – система имитационного моделирования общего назначения [7]. *GPSS*, является системой имитационного моделирования общего назначения. Данная система не ориентирована на решение задач моделирования систем связи и не содержит специализированных элементов и библиотек сетевых протоколов и функций. Она была разработана в конце 60-х – начале 70-х годов и стала одной из первых программных систем имитационного моделирования, хорошо зарекомендовавшая себя при построении моделей различных СМО. Поэтому, до настоящего времени *GPSS* применяется как в процессе обучения, так и для решения некоторых инженерных и научных задач. При разработке моделей в данной системе применяется специализированный язык программирования. Описание модели в *GPSS* представляет собой текст программы, в котором описывается состав исследуемой системы, параметры случайных процессов и определяется состав и способ регистрации статистики. В результате выполнения процесса имитации в текстовом виде выводятся статистические данные о результатах функционирования модели. При решении практических задач, построения моделей достаточно сложных систем, применение *GPSS* затруднительно из-за необходимости выполнения большого объема работ, связанных с программированием.

К достоинствам данной системы можно отнести следующее:

- наличие свободно распространяемых версий программного обеспечения;
- относительная простота изучения языка описания моделей, наличие литературы и технических описаний;
- возможность построения моделей различного назначения, в том числе и моделей сетей связи;
- простая установка программного обеспечения;
- относительно низкие требования к объему вычислительных ресурсов.

К недостаткам можно отнести:

- не интерактивный текстовый интерфейс пользователя (отсутствие возможности "визуального" программирования);
- отсутствие библиотек для построения моделей систем связи;
- трудоемкий процесс описания сложных моделей;
- отсутствуют средства анализа результатов моделирования (обработка статистики, ограниченные возможности построения графиков и диаграмм).

Из-за упомянутых недостатков, в настоящее время *GPSS* относительно редко используется для решения сложных научных и инженерных задач в области связи.

*ns2/ns3 (Network Simulator)* – симулятор сети [74]. Разработка системы имитационного моделирования *ns2* началась в 1989 г., и поддерживается *DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency* – агентством передовых оборонных исследовательских проектов) и рядом других компаний. Данная система разработана для построения моделей сетей связи. Она содержит специализированные библиотеки, включающие модели различных элементов сетей связи (линий, протоколов, узлов). Система моделирования имеет открытый программный код и распространяется бесплатно. Система привлекательна для использования, как в процессе обучения, так и для решения научных задач. Разработка модели заключается в разработке программы на специальном языке программирования. Способ реализации программы модели в *ns2* схож с *GPSS*, но наличие готовых решений для различных элементов сети связи значительно снижает трудоемкость разработки моделей. Результаты модели-

рования также представляют собой набор статистики, выводимой в текстовые файлы, также имеется возможность построение анимационных изображений.

К достоинствам данной системы можно отнести:

- свободное распространение и открытый программный код;
- относительная простота для изучения, наличие документации;
- наличие в составе библиотечных моделей процессов генерации и обслуживания трафика в сетях связи.

Недостатки системы:

- текстовый интерфейс пользователя (отсутствие возможности "визуального" программирования);
- относительно трудоемкий процесс создания новых библиотечных моделей;
- ориентация на операционные системы *UNIX* и *Linux* (возможно использование в *Windows*, с использованием дополнительного программного обеспечения и настройки);
- относительно сложный процесс установки;
- отсутствуют средства анализа результатов моделирования (обработка статистики, построение графиков и диаграмм).

*OPNET modeler* – система моделирования сетей связи [75]. Данная система имитационного моделирования была разработана в Массачусетском университете. Она предназначена для моделирования сетей связи. Система имеет современный интерактивный графический интерфейс с пользователем, поддерживающий режим визуального программирования. Построение модели сети в *OPNET modeler*, в общем случае, состоит из этапов построения моделей процессов, моделей узлов, моделей линии связи, подсетей и сети в целом. На каждом из этих этапов могут быть использованы библиотечные модели устройств электросвязи известных производителей. Система позволяет как использовать готовые модели из библиотеки, так и создавать новые модели. Система позволяет разрабатывать модели сложных сетей благодаря иерархической организации.

К достоинствам системы следует отнести:

- графический интерактивный интерфейс пользователя;

– наличие разнообразных средств обработки и представления результатов моделирования;

– большой набор стандартных библиотечных моделей систем связи;

– простота изучения процесса программирования;

– возможность построения сложных моделей с большим числом компонентов;

В качестве недостатка, по сравнению с рассмотренными выше системами, следует упомянуть высокую стоимость программного обеспечения.

*AnyLogic* – система имитационного моделирования, которая поддерживает такие способы создания имитационных моделей как: процессно-ориентированный (дискретно-событийный), системно динамический и агентный, а также любую их комбинацию [6]. *AnyLogic* представляет собой систему моделирования общего назначения. Она не имеет готовых модулей для моделирования сетей связи и их элементов. Однако, данная система она имеет широкие возможности построения моделей систем массового обслуживания. Графический интерфейс *AnyLogic*, инструменты и библиотеки позволяют достаточно легко создавать модели для широко круга задач, в том числе, и задач, связанных с моделированием сетей связи и их элементов.

Возможность создания собственных библиотек элементов позволяет разработчику многократно использовать однократно разработанные модули. *AnyLogic* поддерживает как дискретный, так и непрерывный подход в пределах одной модели.

Данная система основана на *Java* платформе. Возможность использования языка *Java* позволяет реализовывать собственные алгоритмы обслуживания заявок и обработки данных. В состав системы моделирования входит большой набор функций распределения случайных чисел, позволяющий создавать нужные модели случайных процессов. Средства построения эксперимента, встроенная поддержка моделирования Монте Карло и ряда методов оптимизации дает возможность построения моделей, анализа результатов, задание условий и выбора параметров моделируемой системы. *AnyLogic* также имеет возможность создания интерактивной анимации для наглядного представления моделируемых процессов. Среда разработки и

результатирующие модели и могут быть использованы в операционных системах *Windows, Mac OS* и *Linux*.

Разработанная в *AnyLogic* модель может использоваться как отдельное *Java* приложение, полностью независимое от среды разработки. Для решения задач в рамках данной работы требуется рассмотрение моделей отдельных СМО и исследование их параметров. Поэтому, наиболее привлекательными характеристиками требуемой системы имитационного моделирования являются простота создания модели и возможность получения наглядных результатов. Поэтому, в качестве системы имитационного моделирования выбрана система *AnyLogic*.

#### **2.4.2. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений *IPTD***

Для моделирования "сквозной" передачи трафика в сети следующего поколения в качестве модели маршрута обмена *IP*-пакетами выбирается несколько фаз обслуживания. В программном пакете *Anylogic* создана модель, которая состоит из пяти узлов коммутации, через которые проходит поток пакетов. Поток пакетов генерируется источниками трафика. Число этих источников нагрузки в экспериментах выбиралось разным и составляло 2, 3, 6 и 9 источников.

Характер входящего потока задается распределением интервалов времени между моментами поступления заявок (пакетов). По аналогии с формулой Поллячека-Хинчина [27] основное влияние на величину задержки заявок оказывают первый и второй моменты распределения длительности интервалов между моментами поступления заявок. Следовательно, вид распределения не оказывает существенного влияния на результаты анализа модели. В качестве закона распределения выбрано распределение Вейбулла-Гнеденко [61], плотность вероятности которого определяется такой формулой [9]:

$$f(x) = \frac{c}{a} \left( \frac{x}{a} \right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^c}, x > 0, \quad (2.21)$$

где  $a$  – параметр масштаба и  $c$  – параметр формы.

Функция распределения определяется следующим соотношением:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)} \quad (2.22)$$

Коэффициент вариации определяется таким выражением:

$$V_x = \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{2}{c+1}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{c+1}\right)}} - 1. \quad (2.23)$$

Имитационная модель состоит из пяти узлов коммутации, интенсивность нагрузки в ходе эксперимента варьируется от 0,5 до 0,9 Эрл. Длительность обслуживания определена как постоянная величина. Таким образом, моделируемая система представляет собой СМО  $G/D/1$ .

Предположение о взаимной независимости процессов, которые происходят в узле коммутации, не всегда допустимо. Для того чтобы проверить это предположение, построена имитационная модель обмена  $IP$ -пакетами, в которой рассмотрены различные варианты задания входящего в узлы трафика. Рассмотрены следующие варианты:

1. На вход первого узла поступает поток трафика, генерируемого одним источником трафика, входы последующих узлов соединены с выходами предшествующих узлов сети ("сквозной поток").

2. Отличается от первого варианта тем, что на входы всех узлов поступает трафик от нескольких источников: 1, 2, 3, 6 или 9. Трафик, поступающий от дополнительных источников, обслуживается на соответствующей фазе обслуживания и покидает сеть.

В результате моделирования получена зависимость ошибки оценки задержки пакета от числа потоков трафика, поступающих на входы фаз обслуживания. Полученная зависимость приведена на рисунке 2.14. Данные из таблицы, приведены в приложении 2 (таблица П. 2.1). Для значения  $\rho = 0,9$  пунктирной линией показаны верхняя и нижняя границы (двухсторонний доверительный интервал) для уровня значимости, равного 0,05.

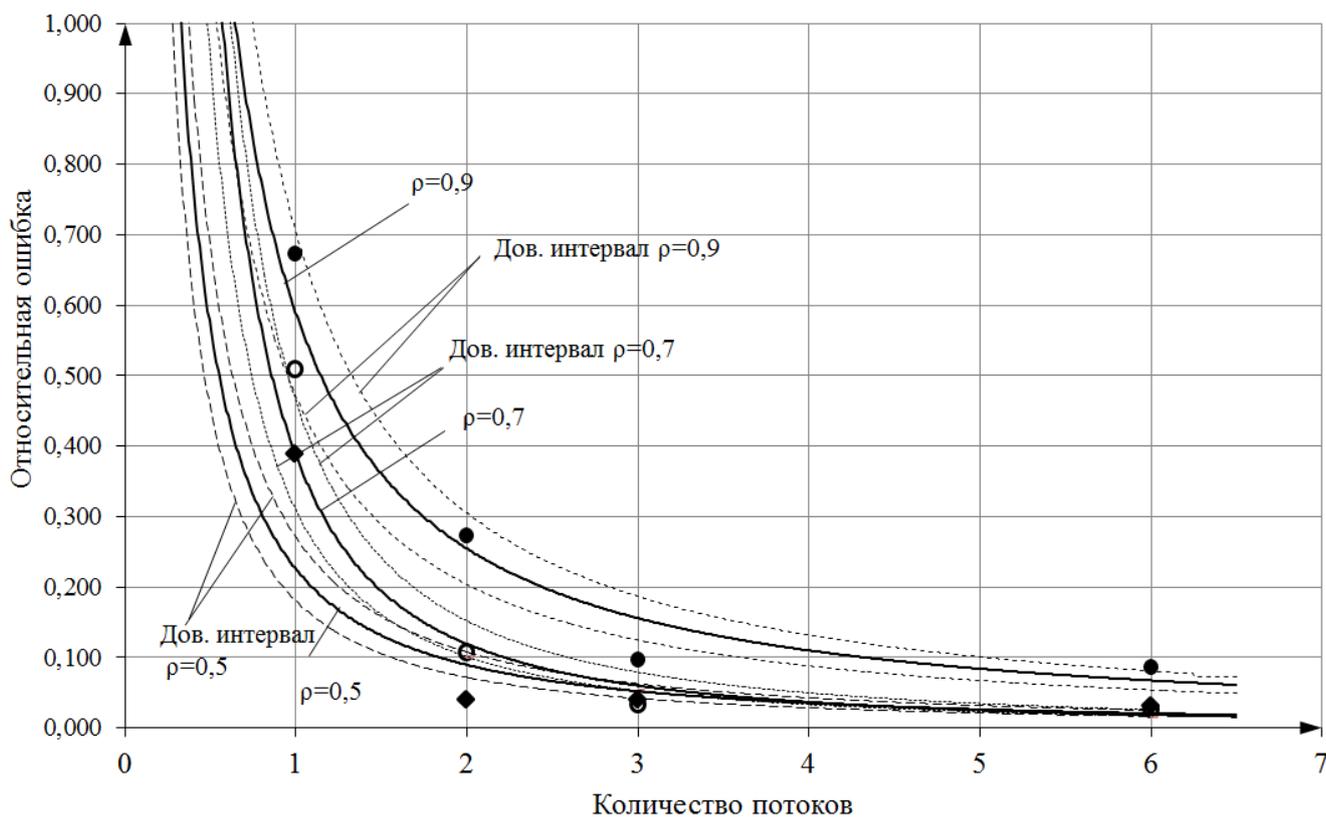


Рисунок 2.14 - Зависимость относительной ошибки задержки от количества потоков

Из рисунка 2.14 видно, что при росте количества потоков, относительная ошибка задержки снижается, а при шести потоках не превышает 10%, что приемлемо для инженерных расчетов при планировании и эксплуатации сети связи.

### 2.4.3. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений *IPLR*

Имитационная модель состоит из восьми узлов коммутации, интенсивность нагрузки варьируется от 0,5 до 0,97 Эрл, длительность обслуживания постоянная. Исследуемая модель представляет собой СМО вида  $G/D/1$ . В результате моделирования была получена зависимость относительной ошибки оценки задержки пакета данных от числа потоков, поступающих на вход СМО на различных фазах обслуживания. Результаты моделирования исследуемого показателя *QoS* в графической форме приведены на рисунке 2.15. Используемые данные приведены в приложении 2 (таблица П. 2.2).

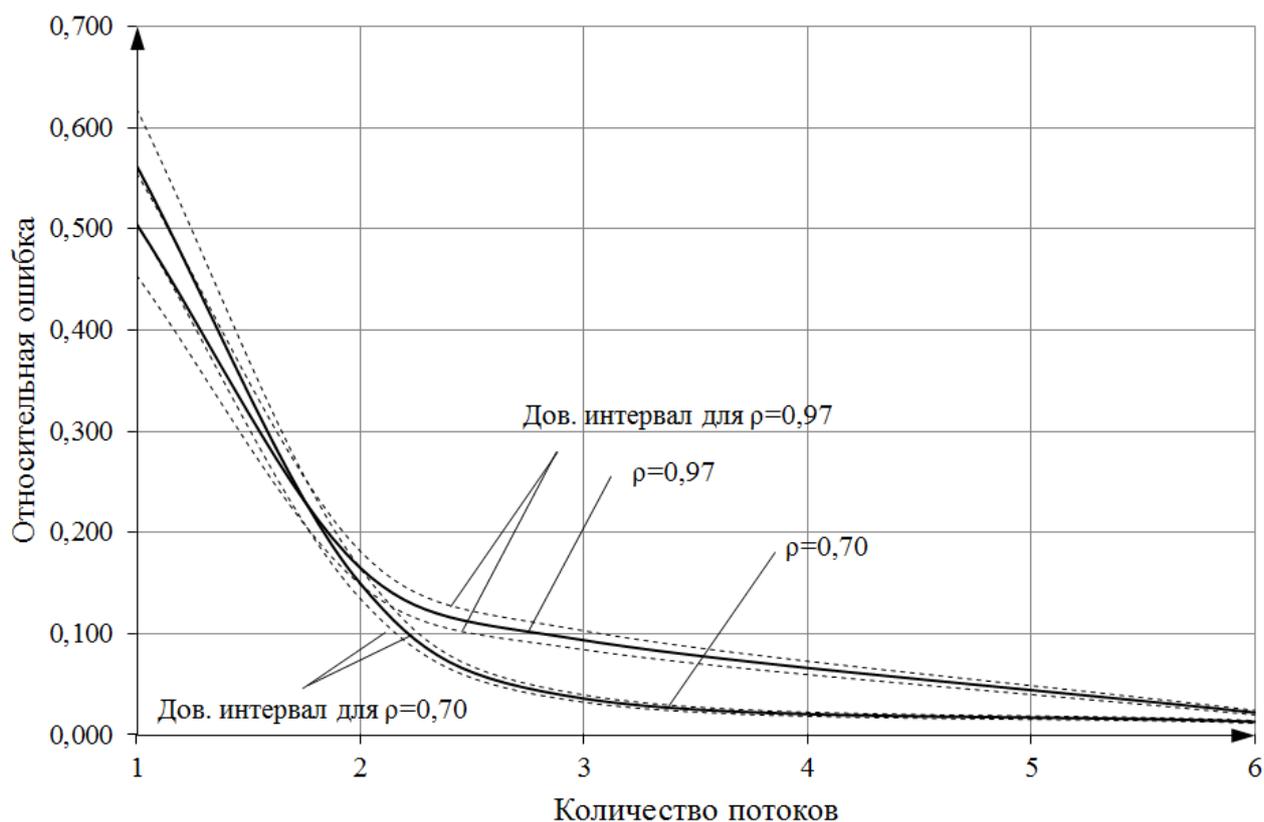


Рисунок 2.15 - Зависимость относительной ошибки при расчете вероятности потерь от количеств потоков

Из рисунка 2.15 видно, что при росте количества потоков, относительная ошибка потери снижается, а при шести потоках не превышает 5%, что приемлемо для инженерных расчетов при планировании и эксплуатации сети связи. На рисунке 2.15 для  $\rho=0,8$  приведены границы доверительного интервала пунктирами линиями; уровень значимости был выбран как 0,9 .

### Выводы

1. В результате анализа характера входящего трафика и механизма его обработки установлено, что в качестве математической модели маршрута обмена IP-пакетами может быть использована модель многофазной системы массового обслуживания.
2. В результате проведенного исследования показано, что в качестве аналитической модели для оценки средней задержки доставки IP-пакетов (показатель

*IPTD*) и вероятности их потерь (показатель *IPLR*) следует использовать модель маршрута в виде совокупности СМО вида  $G/D/1$ .

3. С помощью имитационного моделирования было доказано, что при увеличении количества потоков уменьшается их зависимость на разных фазах обслуживания и снижается относительная ошибка оценок величин задержки доставки и потерь пакетов. Это дает основание для использования предположения о независимости процессов, протекающих в каждой СМО. Тогда выражения для оценки показателей *IPTD* и *IPLR* представимы соотношениями, выраженными в аддитивной и мультипликативной форме соответственно.

## Глава 3

### 3. Декомпозиция показателя *IPDV*

#### 3.1. Задачи оценки квантиля распределения времени задержки *IP*-пакетов

Распределение нормы на показатели *IPTD* и *IPLR* были рассмотрены во второй главе. Для них были определены модели и условия их применения. Полученные результаты дают сравнительно простое решение для оценки показателей качества обслуживания мультисервисного трафика в большинстве практических случаев. В отличие от полученного выше решения, задача декомпозиции вариации задержки (*IPDV*), в общем случае, требует знания функции распределения времени доставки. Декомпозиция *IPDV* является одной из наиболее сложных научных задач среди исследуемых показателей.

Рекомендация МСЭ *Y.1541* [91] определяет данный показатель *QoS*, обозначаемый здесь как  $V$ , следующим образом:

$$V = V_{UPPER} - V_{MIN}. \quad (3.1)$$

Точка  $V_{MIN}$  соответствует тому моменту времени, когда функция распределения становится больше нуля. Например, для распределений, подчиняющихся закону Эрланга  $k$  – го порядка (за исключением случая  $k \rightarrow \infty$ ),  $V_{MIN} = 0$ . Для распределений времени обслуживания, которые исключают возможность нулевого времени обработки или передачи пакета,  $V_{MIN} \geq 0$ . Точка  $V_{UPPER}$  определяет квантиль функции распределения, который задан как верхняя граница задержки для заранее выбранной доли пакетов. Рекомендация *Y.1541* нормирует разность (3.1) в точке 99,9% на графике функции распределения, которая характеризует длительность задержки пакетов в *IP* сети.

Для наглядного пояснения формулы (3.1) на рисунке 3.1 выделены две рассматриваемые точки на графике функции распределения. Вид кривой не существен. Значение  $V_{MIN}$  оценивается как время прохождения *IP* пакета между терминалами при условии, что длительность ожидания в очереди на передачу и обработку

равна нулю. Для любого маршрута передачи  $IP$  пакета, состоящего из  $l$  битов, вычисление  $V_{MIN}$  не представляет проблем.

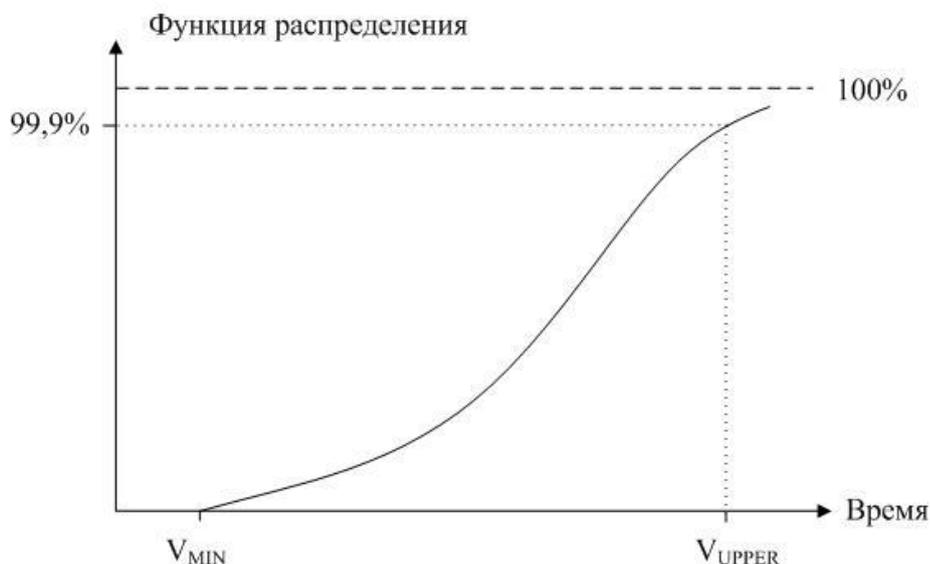


Рисунок 3.1 - Принципы определения показателя  $IPDV$

Допустим, что:

- обмен информацией осуществляется через  $N - 1$  узлов;
- в каждом  $i$  – ом узле время обработки пакета составляет  $t_i$ ;
- скорость передачи между смежными узлами равна  $C_{i,i+1}$  бит/с.

Тогда искомая величина рассчитывается на основе элементарных соображений по такой формуле (3.2):

$$V_{MIN} = \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{l}{C_{i,i+1}}. \quad (3.2)$$

Существенно сложнее оценить  $V_{UPPER}$ . Необходимо найти выражение для функции распределения  $S(t)$ . В [91] предполагается, что и величину  $V_{UPPER}$  можно найти за счет оценок, предложенных в [20]. Несложные вычисления показывают, что такой подход чреват весьма существенными ошибками. Поэтому лучше использовать выражения для функций распределения  $S(t)$ , которые позволяют с приемлемой точностью найти квантиль для значения  $S(t)$ , то есть величину  $V_{UPPER}$ . Вывод функций распределения  $S(t)$  будет приведен позднее.

Необходимо найти рациональный способ распределения (декомпозиции) разницы ( $V_{UPPER} - V_{MIN}$ ) по основным фрагментам *IP* сети. Сначала целесообразно исследовать зависимость квантиля  $V_{UPPER}$  от числа фаз обслуживания  $N$  и их нагрузки  $\rho$ . Для подобных задач удобно исследовать многофазные системы, состоящие из идентичных фаз с одинаковыми характеристиками трафика.

Таким образом, для решения задачи требуется получить распределение нормы на показатель вариации задержки *IPDV* для различных фаз СМО. Для анализа *IPDV* необходимо знать квантиль функции распределения времени задержки IP-пакетов  $S(t)$ . Поэтому в диссертационной работе задача поиска вариации задержки *IPDV* выделена в отдельную главу.

Исследование поведения квантиля функции  $S(t)$  в зависимости от числа фаз обслуживания (количества коммутаторов в соединении между терминалами пользователей) –  $m$  и их нагрузки –  $\rho$  осуществляется путем анализа сети массового обслуживания. Для трафика речи рекомендацией МСЭ Y.1541 установлена норма для разницы квантиля функции  $S(t)$  в точке  $0,999 - V_{upper}$  и минимального значения времени обмена пакетами (при отсутствии очередей) –  $V_{min}$ . Нормативное значение *IPDV* обычно равно 50мс [91].

### **3.2. Аналитическое исследование квантиля для расчета показателя *IPDV***

Маршрут обмена *IP*-пакетами между интерфейсами UNI в общем случае включает  $m$  УК. Это позволяет в качестве объекта исследования выбрать  $m$ - фазную систему массового обслуживания. Для изучения процессов задержки *IP*-пакетов время распространения сигналов между двумя интерфейсами *UNI* можно учитывать отдельно, так как данная величина зависит от длины линии связи, а в данной задаче является постоянной. При вычислении показателя *IPDV* ее значение величины не существенно.

Тогда исследуемая модель СМО включает  $m$  фаз обслуживания. На  $i$ -ю фазу ( $i = \overline{1, m}$ ) поступает поток заявок (ими становятся IP-пакеты) с интенсивностью  $\lambda_i$ . Интенсивность обработки заявок на  $i$ -й фазе модели обозначается греческой бук-

вой  $\mu_i$ . Сделаем предположения о том, что поток заявок на входе каждой фазы является пуассоновским, а время обслуживания заявок случайно и распределено по экспоненциальному закону.

Каждая фаза рассматриваемой модели представляет собой однолинейную систему массового обслуживания. В классификации Кендалла [27] она обозначается символами  $M/M/1$ . Следует отметить, что данная модель используется здесь для выявления ряда общих закономерностей, касающихся изменения показателя  $IPDV$ . Далее будем предполагать, что все интенсивности заявок  $\lambda_i$  равны между собой. В этом случае нижний индекс  $i$  можно не использовать. Аналогичная гипотеза принимается для интенсивностей обслуживания  $\mu_i$ .

Отношение  $\lambda$  к  $\mu$ , которое называется нагрузкой (или загрузкой) системы и обычно обозначается буквой  $\rho$ , при использовании дисциплины обслуживания заявок с возможностью ожидания в очереди (с ожиданием) должно быть меньше единицы [88].

Рассмотрим двухфазную систему массового обслуживания с нагрузкой на фазах  $\rho_1$  и  $\rho_2$  соответственно. Величина  $\rho_i$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) определяется отношением величин интенсивности входящего потока заявок  $\lambda_i$  и обслуживания  $\mu_i$  [91]. Первый вариант функционирования модели предусматривает  $\rho_1 \neq \rho_2$ , а второй основан на равенстве величин нагрузки, то есть  $\rho_1 = \rho_2$ . Функция распределения (ФР) длительности задержки заявок имеет преобразование Лапласа-Стилтьеса  $\varphi(s)$ , которое для моделей вида  $M/M/1$  может быть представлено в такой редакции [20]:

$$\varphi_1(s) = \frac{(\mu_1 - \lambda_1)(\mu_2 - \lambda_2)}{[s + (\mu_1 - \lambda_1)][s + (\mu_2 - \lambda_2)]}. \quad (3.3)$$

Если  $\lambda_1 = \lambda_2$  и  $\mu_1 = \mu_2$ , то справедливо равенство  $\rho_1 = \rho_2$ . В этом случае нижние индексы можно опустить, что позволяет упростить соотношение (3.4):

$$\varphi_{II}(s) = \frac{(\mu - \lambda)^2}{[s + (\mu - \lambda)]^2}. \quad (3.4)$$

Из преобразования (3.3) на основании правил, приведенных, например, в [36], можно получить ФР, обозначаемую далее как  $S_1(t)$ :

$$S_1(t) = 1 - \frac{(\mu_2 - \lambda_2)e^{-(\mu_1 - \lambda_1)t} - (\mu_1 - \lambda_1)e^{-(\mu_2 - \lambda_2)t}}{(\mu_2 - \lambda_2 - \mu_1 + \lambda_1)}. \quad (3.5)$$

Используя те же правила получения оригинала функции по ее изображению [20], получаем искомую ФР для второго варианта. Она далее обозначается как  $S_{II}(t)$ :

$$S_{II}(t) = 1 - [1 + (\mu - \lambda)t] \cdot e^{-(\mu - \lambda)t}. \quad (3.6)$$

Если количество фаз в составе модели равно  $m$  и  $m \geq 3$ , то функции (3.4) и (3.4) обозначаемые как  $S_1(m, t)$  и  $S_{II}(m, t)$ , усложняются. Соответствующие изображения представимы в форме (3.7) и (3.8):

$$\varphi_1(s) = \frac{\prod_{i=1}^m (\mu_i - \lambda_i)}{\prod_{i=1}^m [s + (\mu_i - \lambda_i)]}, \quad (3.7)$$

$$\varphi_{II}(s) = \frac{(\mu - \lambda)^m}{[s + (\mu - \lambda)]^m}. \quad (3.8)$$

Для получения функции  $S_1(m, t)$  можно использовать правило получения оригинала, когда знаменатель изображения имеет простые корни [20]. В этом случае искомая функция распределения определяется по следующей формуле:

$$S_1(m, t) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^m (\mu_i - \lambda_i)}{\mu_k - \lambda_k} \cdot \sum_{k=1}^m \frac{e^{-(\mu_k - \lambda_k)t}}{f(\mu_k, \lambda_k)}, \quad (3.9)$$

в которой функция  $f(\mu_k, \lambda_k)$  определяется как производная от знаменателя (3.7), из которого удален сомножитель  $[s + (\mu_i - \lambda_i)]$ . Она находится по правилу получения производной из произведения функций [26]. Функция  $S_{II}(m, t)$  определяется следующим образом [53]:

$$S_{II}(m, t) = 1 - e^{-(\mu - \lambda)t} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{[(\mu - \lambda)t]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \quad (3.10)$$

Для исследования поведения функций  $S_I(m, t)$  и  $S_{II}(m, t)$ , а также изменений квантилей обеих распределений будем считать, что  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ . При этом различие фаз заключается в несовпадении величин  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , которые связаны между собой посредством величины  $\Delta\lambda$ :

$$\lambda_1 = \lambda + \Delta\lambda, \quad \lambda_2 = \lambda - \Delta\lambda. \quad (3.11)$$

Величина  $\Delta\lambda$  должна выбираться так, чтобы соблюдались два очевидных условия:

$$\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\mu} < 1, \quad \lambda - \Delta\lambda > 0. \quad (3.12)$$

Таким образом, для принятых выше допущений функция распределения времени задержки заявок  $S(m, t) = p$  может быть представлена в такой форме [53]:

$$S(m, t) = 1 - e^{-(1-\rho)\mu t} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{[(1-\rho)\mu t]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \quad (3.13)$$

Значение квантиля  $t_p$  вычисляется численно из этого соотношения при условии, что  $S(m, t) = p$ . Функция распределения для различных узлов коммутации  $m$  приведена выше (во второй главе диссертационной работы) на рисунке 2.6.

На рисунке 3.2 показана зависимость квантиля  $t_p$  для  $p = 0,999$  от количества фаз обслуживания  $m$ . Графики построены при условии, что интенсивность обслуживания  $\mu = 1$ . Количество фаз изменяется от 1 до 7, а нагрузка изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,9. Выбранные для построения графиков численные значения перечисленных параметров определены на основе практически значимых значений соответствующих технических характеристик. Величина квантиля, отложенная по оси ординат, нормирована к среднему времени обслуживания заявок (то есть, умножена на  $\mu$ ), которое для принятых допущений равно единице.

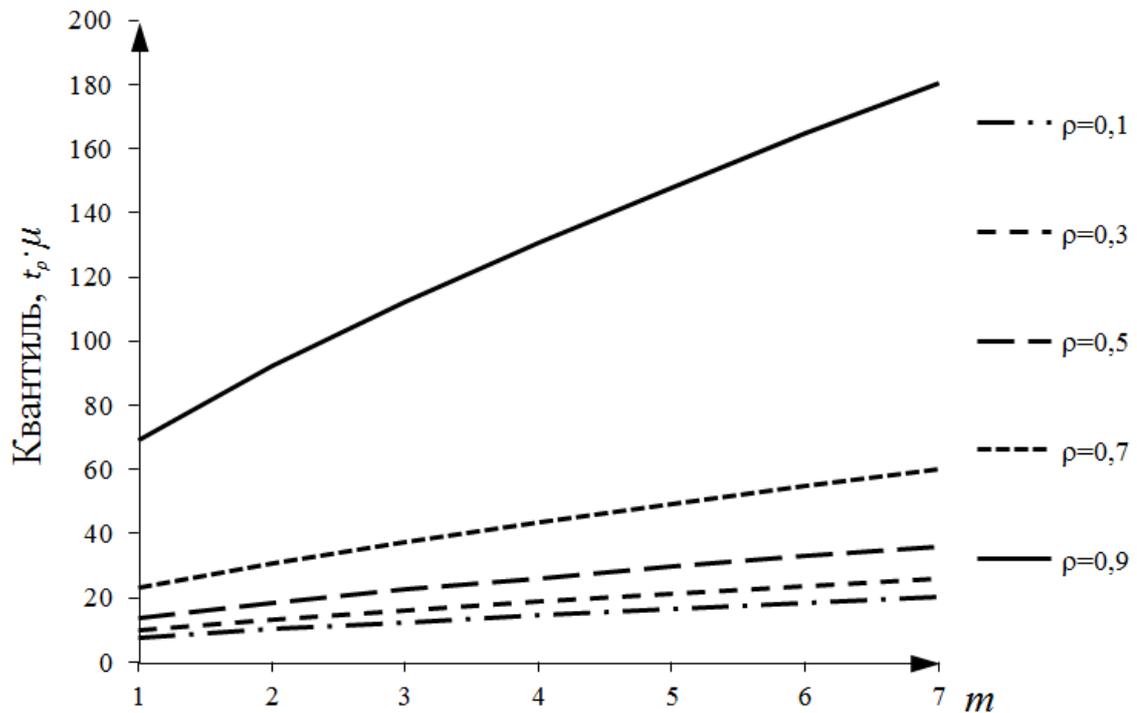


Рисунок 3.2 - Зависимость квантиля  $t_p$  от нагрузки  $\rho$  и количества фаз  $m$

Характер кривых свидетельствует, что закон изменения величины квантиля по мере роста количества фаз обслуживания близок к линейному [44]. Этот факт позволяет оценивать квантиль при помощи функции, зависящей от  $m$  и  $\rho$ . Она обозначена ниже как  $t_p(m, \rho)$ :

$$t_p(m, \rho) = a(m, \rho) \cdot m + b(m, \rho). \quad (3.14)$$

Коэффициенты  $a(m, \rho)$  и  $b(m, \rho)$  вычисляются методом наименьших квадратов [28]. Аппроксимация зависимости квантиля от числа фаз обслуживания при различной величине интенсивности нагрузки приведена на рисунке 3.3.

Анализ характера изменений этих коэффициентов позволил получить следующее приближение:

$$t_p(m, \rho) \approx \frac{1,838 \cdot m + 5,468}{1 - \rho}. \quad (3.15)$$

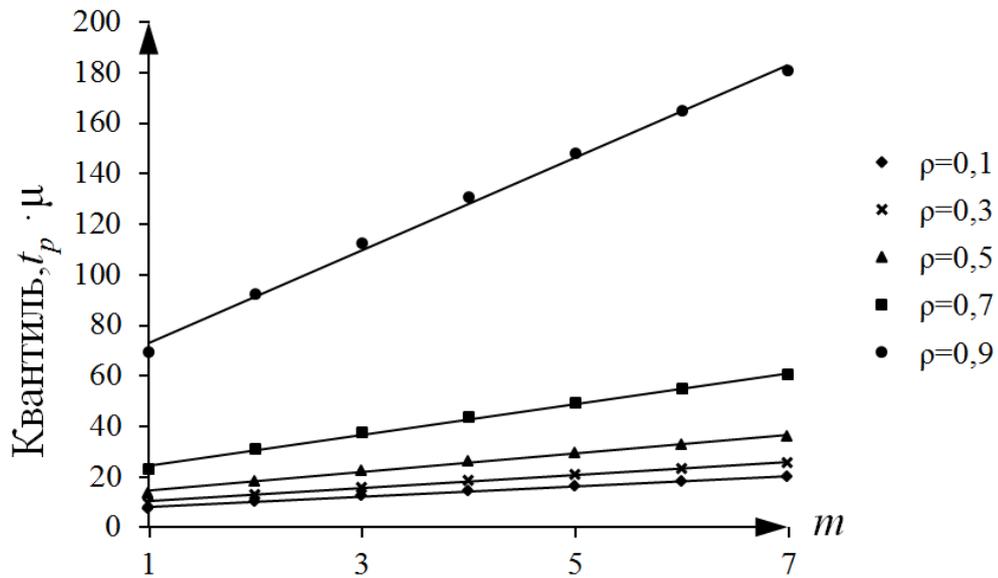


Рисунок 3.3 - Аппроксимация зависимости квантиля  $t_p$  от нагрузки и количества фаз обслуживания

Точность полученного приближения оценивается ошибкой, допускаемой при расчете исследуемого квантиля. При  $0,1 \leq \rho \leq 0,9$  и  $2 \leq m \leq 7$  величина относительной ошибки при расчете квантиля по приближенной формуле не превышает 6%, что вполне допустимо для большей части задач, связанных с декомпозицией показателя *IPDV*. Обозначим значение квантиля распределения времени задержки заявок на одной фазе через  $x$ . Линейная зависимость  $t_p(m, \rho)$  от  $m$  позволяет подставить в левую часть полученного приближения произведение  $m \cdot x$ . Тогда величина  $x$  оценивается по простой формуле:

$$x = \frac{1,838 \cdot m + 5,468}{(1 - \rho) \cdot m}. \quad (3.16)$$

Величина показателя *IPDV* с точностью до константы, вычисление которой не представляется сложной проблемой, определяется квантилем. Зависимость коэффициентов  $a(m, \rho)$  и  $b(m, \rho)$  от интенсивности нагрузки приведена на рисунке 3.4.

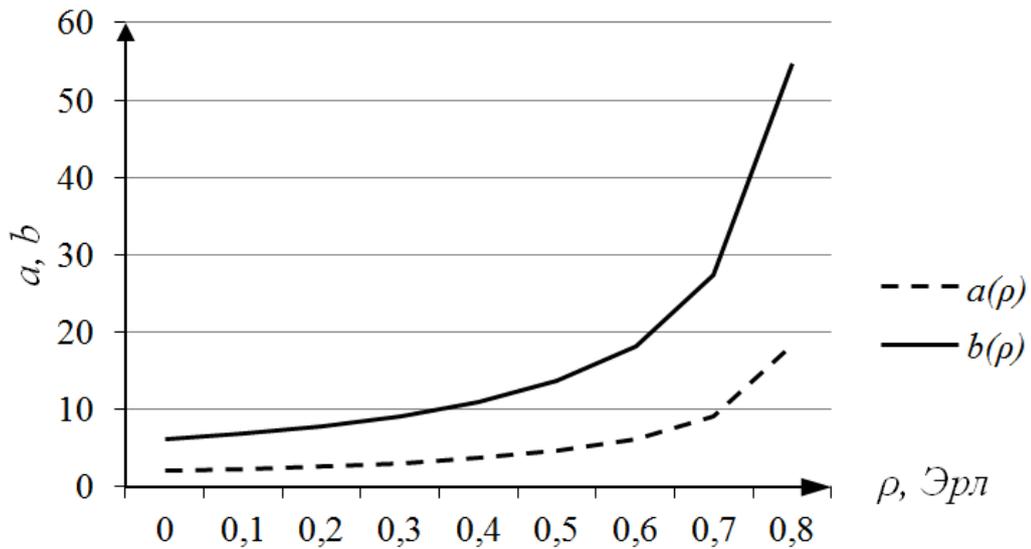


Рисунок 3.4 - Зависимость коэффициентов  $a(m, \rho)$  и  $b(m, \rho)$  от  $\rho$  интенсивности нагрузки

Таким образом, при допустимости модели  $M/M/1$  величина квантиля, а, следовательно, и вариация задержки доставки пакета могут быть с достаточной для практического применения точностью оценены с помощью полученной выше линейной аппроксимации.

### 3.3. Точечные и интервальные оценки

Результаты имитационного моделирования, как и результаты любого эксперимента, имеют погрешность. Поскольку измеряемые величины случайны, точность их оценок конечна. Если необходимо оценить конкретный параметр функционирования, представляющий собой случайную величину  $\xi$ , то для его оценки используется выборка из некоторого числа  $n$  измерений. Оценкой математического ожидания случайной величины  $M(\xi)$ , согласно методу наибольшего правдоподобия [11], является среднее выборочное значение (далее именуемое как просто среднее):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.17)$$

Вероятность того, что исследуемая непрерывная случайная величина будет равна своему среднему значению (как и любому другому значению) равна нулю.

Поэтому, точечная оценка (оценка среднего значения) не дает полного представления о случайной величине. Более полная характеристика значения случайной величины дается интервальной оценкой. В случае интервальной оценки с заданной доверительной вероятностью  $1 - \frac{\alpha}{2}$  утверждается, что математическое ожидание величины  $M(\xi)$  находится в границах интервала  $\xi = \bar{x} \pm \Delta$ . Этот интервал называют доверительным [11]. Ширина доверительного интервала для математического ожидания случайной величины зависит от значения доверительной вероятности, количества наблюдений случайной величины и среднеквадратического отклонения [10].

$$\Delta = t_{r, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = t_{r, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sqrt{D(\xi)}}{\sqrt{n}}, \quad (3.18)$$

где  $t_{r, 1-\frac{\alpha}{2}}$  – коэффициент Стьюдента для величины доверительной вероятности  $1 - \frac{\alpha}{2}$ .

Выборочная дисперсия определяется по такой формуле:

$$D(\xi) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.19)$$

Из (3.18) видно, что ширина доверительного интервала, при конечной величине дисперсии случайной величины, зависит от числа измерений  $n$ .

Если, например, задана требуемая относительная погрешность оценки значения

$$\delta = \frac{\Delta}{\bar{x}} = t_{r, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sqrt{D(\xi)}}{\bar{x}\sqrt{n}}, \quad (3.20)$$

то необходимое для получения оценки количество испытаний, может быть определено как

$$n = D(\xi) \left( \frac{t_{r, 1-\frac{\alpha}{2}}}{\bar{x}\delta} \right)^2. \quad (3.21)$$

Выражение (3.21) позволяет вычислить требуемое количество испытаний, необходимое для получения заранее заданной точности оценки математического ожидания величины. Как видно из данного выражения в нем фигурирует величина дисперсии, которая, как правило, определяется в ходе измерений. Поэтому, фактически, эксперимент должен включать в себя два этапа. На первом этапе – получение предварительной выборки, на основании которой производится вычисление дисперсии  $D(\xi)$ . На втором этапе определяется число измерений, необходимое для получения окончательной выборки, по которой производится оценка математического ожидания.

### **3.3.1. Интервальные оценки вероятностных параметров *NGN***

В параметрах функционирования *NGN* можно выделить группу параметров, характеризующих вероятность того или иного события. Например, потеря пакета, ошибка данных в пакете, отказ в доступе. Эти параметры характеризуются вероятностями данных событий. В целях оценки этих вероятностей, практически, используется метод измерений с последующей оценкой вероятности.

### **3.3.2. Интервальные оценки временных параметров *NGN***

Временными параметрами функционирования сети связи являются такие параметры как средняя задержка доставки *IP* пакета *IPTD* и вариация *IPDV* (разброс времени доставки пакета).

Задержка доставки является одним из основных временных параметров, характеризующих качество обслуживания трафика пользователя. Превышение задержки выше определенного значения приводит к осязаемому снижению качества предоставления услуг связи. Величина задержки доставки пакета случайна и характеризуется распределением (плотностью распределения) вероятности и его параметрами. Поэтому нормативное значение задержки не может быть задано в виде одного числа, так как теоретически случайная величина может принимать любые значения из диапазона, в котором она определена. В данном случае диапазон ее определения от нуля и до определенного технической реализацией (протоколом) таймаута. Этот

диапазон, как правило, гораздо шире допустимых, с точки зрения качества предоставления услуг, значений. Иными словами, всегда существует отличная от нуля вероятность превышения любой установленной нормы (в упомянутом диапазоне). Полная характеристика случайной величины может быть получена изучением ее распределения вероятности и оценкой его параметров. В общем случае, распределение вероятности задержки зависит от многих факторов, таких как виды обслуживаемого трафика и их интенсивности, способы управления трафиком и т.д. В рекомендации [91] *IPTD* определяется как верхняя граница среднего значения. Такое определение можно интерпретировать как верхнюю границу доверительного интервала для оценки математического ожидания.

$$IPTD = \overline{IPTD} + \Delta, \quad (3.22)$$

где  $\Delta$  односторонний доверительный интервал:

$$\Delta = z_{1-\alpha} \sigma, \quad (3.23)$$

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

$z_{1-\alpha}$  – квантиль нормального распределения для доверительной вероятности  $1 - \alpha$ .

Вариация задержки (*IPDV*) также является важной характеристикой качества обслуживания трафика пользователя. Для некоторых услуг, в первую очередь потоковых (например, *VoIP* – передача речи через пакетную сеть) значительный разброс задержки приводит к снижению качества предоставления услуги из-за возникновения ощутимой пользователем задержки реакции собеседника, а также "пропадания" частей слов и фраз. Поэтому величина задержки должна соответствовать нормативному значению, установленному для данного класса обслуживания трафика.

В [91] приведены пояснения, значения и определения *IPDV*. Основным смыслом этих пояснений состоит в том, что эта величина должна отражать возможное изменение задержки в сети связи. В соответствии с [91] вариация задержки может определяться как на базе оценки измеренных временных интервалов, так и на базе оценки квантилей распределения задержки.

При определении  $IPDV$  на основе измеренных временных интервалов вариация задержки [91] определяется как

$$IPDV = IPTD_{MAX} - IPTD_{MIN}, \quad (3.24)$$

где  $IPTD_{MAX}$  – максимальное значение задержки, полученное на рассматриваемом интервале времени [91].

При определении  $IPDV$  на основе квантилей распределения задержки она определяется как разница между верхним и нижним квантилями распределения [91]

$$IPDV = IPTD_{UPPER} - IPTD_{LOWER}, \quad (3.25)$$

где  $IPTD_{UPPER}$  – верхний квантиль распределения  $IPTD$ , полученного по результатам измерений,  $IPTD_{LOWER}$  – нижний квантиль распределения  $IPTD$ , полученный на интервале измерений.

Графическое толкование данного определения приведено на рисунке 3.5. На приведенном рисунке  $f(x)_{IPTD}$  – это функция плотности распределения времени доставки пакета,  $IPTD_{LOWER}$  и  $IPTD_{UPPER}$  – нижний и верхний квантили распределения  $f(x)_{IPTD}$  соответственно.

Вероятность того, что величина задержки  $x$  лежит в заданных пределах  $IPTD_{LOWER} < x < IPTD_{UPPER}$  равна  $1 - \alpha$ , это утверждение эквивалентно тому, что величина вариации задержки не превышает величины  $IPTD_{UPPER} - IPTD_{LOWER}$  с вероятностью  $1 - \alpha$ . Величина задержки меньше величины  $IPTD_{LOWER}$  или превышает  $IPTD_{UPPER}$  с вероятностью  $\frac{\alpha}{2}$ .

Приведенная интерпретация вариации задержки позволяет характеризовать не только величину вариации, но и его вероятностный характер. Вероятность того, что вариация задержки не превысит величины  $IPDV$ , будет определяться как

$$p(x < IPDV) = \int_{IPTD_{LOWER}}^{IPTD_{UPPER}} f(x)_{IPTD} dx. \quad (3.26)$$

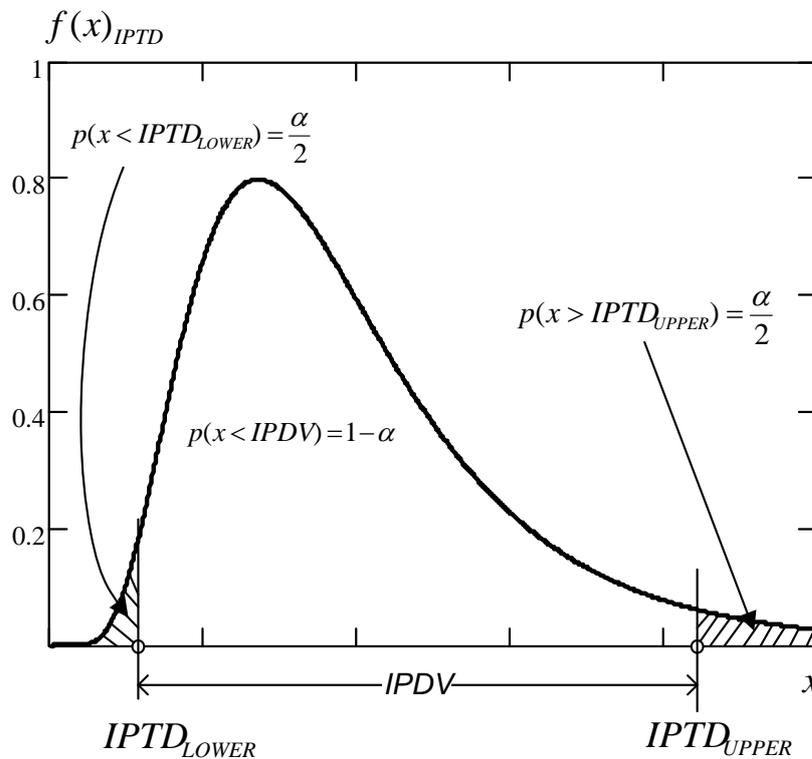


Рисунок 3.5 - Определение  $IPDV$  на основе квантилей распределения задержки.

В целях контроля соответствия вариации задержки нормативному значению удобнее пользоваться последним ее определением, т.е. определением через квантили распределения задержки.

### 3.4. Оценка погрешности в расчете $IPDV$

Поставленную задачу можно решить, зная характер распределения времени задержки  $IP$ -пакетов между интерфейсами  $UNI$ . Это распределение далее обозначается как  $S(t)$ . После получения этого распределения путем численного решения уравнения  $p = S(t)$  находится квантиль  $t_p$ . Величина  $IPDV$  представляет собой разницу между квантилем  $t_p$  и минимальным временем доставки  $IP$ -пакетов между интерфейсами  $UNI$ , определение которого не вызывает затруднений. Таким образом,

поставленная задача сводится к получению функции  $S(t)$  или ее приближенной оценки.

Для постановки задачи по оценке  $S(t)$  требуется выбрать математическую модель, отражающую основные особенности пакетных технологий передачи и коммутации. Пример такой модели был приведен выше на рисунке 2.1 (во второй главе диссертационной работы). Модель иллюстрирует процесс обмена IP-пакетами между двумя интерфейсами  $UNI$  через  $m$  узлов коммутации.

В качестве математического аппарата для решения поставленной задачи предлагается использовать ряд Эджворта, с помощью которого можно получить приближенную функцию распределения. Параметрами данной модели являются кумулянты, которые практически могут быть получены путем измерений. Предварительно необходимо ввести следующие условия и допущения:

1. Маршрут доставки пакета состоит из нескольких участков.
2. Модель маршрута, построенная на основе моделей отдельных участков, представляет собой многофазную СМО.
3. Для многофазной СМО получение точной аналитической функции распределения времени доставки возможно лишь в частных случаях.
4. Применение ряда Эджворта позволяет получить аналитической модели функции распределения времени доставки на основе известных кумулянт, которые на практике могут быть получены путем измерений.
5. Для оценки применимости данного метода исследуем зависимость ошибки, вносимой применением ряда Эджворта на примере последовательности СМО  $M/M/1$ , которая имеет аналитическое решение.

На вход  $i$ -го УК  $i = \overline{1, m}$  поступает совокупность потоков IP-пакетов. Она характеризуется функцией распределения (ФР), обозначенной как  $A_i(t)$ . Для каждого УК задана также ФР времени обработки IP-пакетов  $-B_i(t)$ . При использовании однотипного оборудования во всех УК функции  $B_i(t)$  будут идентичны. Различие распределений  $A_i(t)$  обусловлено, в основном, уровнем нагрузки каждого УК в составе

маршрута обмена *IP*-пакетами между двумя интерфейсами *UNI*. Для идеализированной модели можно полагать, что все распределения  $A_i(t)$  также идентичны.

Искомая ФР  $S(t)$  определяется между интерфейсами *UNI*. В ряде случаев для каждого  $i$ -го УК может быть получена ФР вида  $S_i(t)$ . Для поиска распределения  $S(t)$  по известным ФР типа  $S_i(t)$  необходимо использовать операцию свертки [20] что, как правило, влечет за собой применение очень сложного алгоритма вычислений. Он заметно упрощается при введении следующего предположения: все распределения  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$  могут считаться экспоненциальными [9] с параметрами  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  соответственно. Данное допущение полезно для выявления общих закономерностей поведения функций  $S_i(t)$  и  $S(t)$ . Кроме того, упрощение характера ФР вида  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$  позволяет получить численные оценки, которые могут уточняться при помощи имитационного моделирования.

Основное внимание в данном разделе уделяется распределению  $S(t)$ , так как квантиль  $t_p$  нормируется между интерфейсами *UNI*. В качестве аппроксимации ФР вида  $S(t)$  далее используется ряд Эджворта [20]. Он позволяет представить исследуемую функцию  $S(t)$  через нормальное распределение  $\Phi(t)$  и его производные  $\Phi^{(k)}(t)$  [26, 20]:

$$S(t) = \Phi(t) + \sum_{k=3}^{\infty} (-1)^k \frac{h_k}{k!} \Phi^{(k)}(t), \quad (3.27)$$

где  $h_k$  – квазимоменты распределения  $k$  – го порядка, определяемые через кумулянты  $k_i$ . Обычно используются не более четырех членов суммы по  $k$ . Для них квазимоменты определяются такими соотношениями:

$$h_3 = k_3, \quad h_4 = k_4, \quad h_5 = k_5, \quad h_6 = k_6 + 10(k_3)^2. \quad (3.28)$$

Близость распределения  $S(t)$  и его аппроксимации рядом Эджворта удобно исследовать для приведенной выше гипотезы о возможности описания функций  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$  экспоненциальным законом. Если к тому же параметры  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  для всех УК

идентичны (тогда нижние индексы не нужны), то искомое распределение  $S(t)$  выражается аналитически [53]:

$$S(t) = 1 - e^{-(\mu-\lambda)t} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} \frac{[(\mu-\lambda)t]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \quad (3.29)$$

Функция распределения и ее представление, полученное с помощью ряда Эджворта  $\hat{S}(t)$ , приведены на рисунке 3.6.

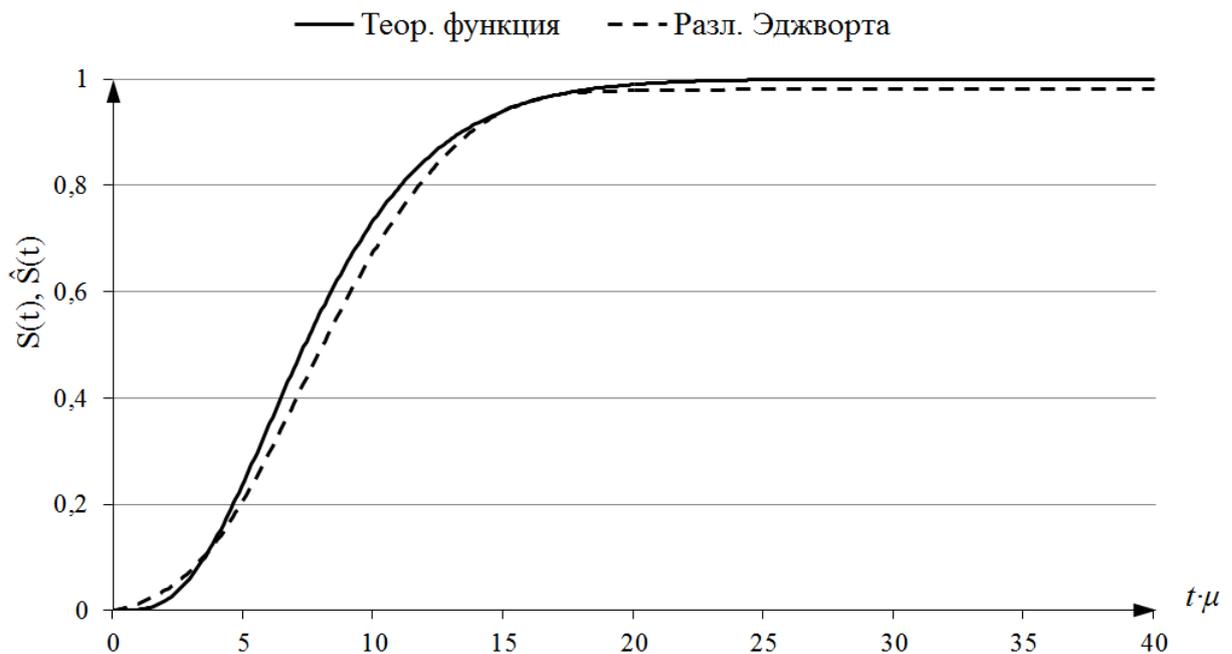


Рисунок 3.6 - Функция распределения и ее представление, полученное с помощью ряда Эджворта

В работе [35] показано, что для экспоненциальных законов распределения  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$  нормируемый квантиль  $t_p$  можно заменить, если это целесообразно, квантилем  $t_i(x)$ .

При этом значение соответствующей ФР меняется с  $p$  на  $p(x)$ . Формула для "нового" значения квантиля определяется следующим соотношением [40]:

$$t_p(x) = t_p \cdot \frac{\ln(1-p_x)}{\ln(1-p)}. \quad (3.30)$$

Подобный подход представляется разумным, так как в [91] нормируется значение  $p = 0,999$ , а для имитационного моделирования удобнее использовать величину  $p_x = 0,95$ . Кроме того, расчет значений ФР на ее "хвосте" зачастую связан с существенными проблемами по обеспечению необходимой точности вычислений при использовании стандартных программных продуктов.

Кумулянты экспоненциального распределения для времени задержки *IP*-пакетов могут быть получены из начальных моментов [20]. Выполняя необходимые операции, получаем:

$$k_i = \frac{(i-1)!}{(\mu - \lambda)^i}. \quad (3.31)$$

На основании (3.28) несложно получить необходимые соотношения для расчета квазимоментов:

$$h_3 = \frac{2}{(\mu - \lambda)^3}, \quad h_4 = \frac{6}{(\mu - \lambda)^4}, \quad h_5 = \frac{24}{(\mu - \lambda)^5}, \quad h_6 = \frac{160}{(\mu - \lambda)^6}. \quad (3.32)$$

Точные значения квантиля  $t_p(x)$  можно получить численно из соотношения (3.29), а приближенные оценки из выражения (3.27) с учетом формулы (3.32). Относительные ошибки, возникающие при использовании ряда Эджворта, приведены в таблице 3.1.

Исследуемые величины ошибок –  $\delta(m, \rho)$  рассчитаны для различного количества УК в составе маршрута (величина  $m$ ) и нагрузки УК –  $\rho$ , которая равна отношению  $\lambda$  к  $\mu$ . Выше было отмечено, что одно из важнейших направлений в дальнейших исследованиях – декомпозиция показателя *IPDV*. Актуальность этой процедуры заметно возрастает при повышении нагрузки в сети *NGN*. Как видно из данных, приведенных в таблице 3.1, при росте нагрузки ошибка в расчете квантиля  $t_p(x)$  снижается. Более того, для практически важных диапазонов изменения нагрузки и количества УК в составе маршрута значения относительной ошибки, выделенные жирным шрифтом, остаются стабильными [39, 41]. Этот факт свидетельствует о

возможности применения ряда Эджворта для оценки квантилей распределения времени задержки *IP*-пакетов между интерфейсами *UNI*.

Таблица 3.1 – Относительные ошибки при оценке квантиля  $t_p(x)$

$m$	Значения величины $\delta(m, \rho)$					
	$\rho = 0,5$	$\rho = 0,6$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,8$	$\rho = 0,9$	$\rho = 0,95$
2	0.020	0.005	0.233	0.093	0.126	0.064
3	0.019	0.032	0.048	0.067	0.091	0.091
4	0.001	0.001	0.003	0.005	0.008	0.010
5	0.019	0.019	0.019	0.018	0.018	0.018
6	0.031	0.031	0.032	<b>0.032</b>	<b>0.032</b>	<b>0.033</b>
7	0.003	0.034	0.032	<b>0.032</b>	<b>0.032</b>	<b>0.033</b>
8	0.032	0.032	0.032	<b>0.033</b>	<b>0.033</b>	<b>0.033</b>
9	0.031	0.031	0.032	<b>0.032</b>	<b>0.032</b>	<b>0.032</b>
10	0.030	0.030	0.030	<b>0.030</b>	<b>0.031</b>	<b>0.031</b>

Предложенный метод для оценки квантилей распределения времени задержки *IP*-пакетов на основе ряда Эджворта доказал свою эффективность при условии, что УК в сети *NGN* может быть представлен при помощи простейшей модели телетрафика. Исследование принципов функционирования УК в составе сети *NGN* показало, что использование простейшей модели телетрафика не всегда приемлемо [52]. По этой причине основным направлением дальнейших исследований следует считать возможность применения предлагаемого метода оценки вариации задержки *IP*-пакетов при условии, что функции  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$  заметно отличаются от экспоненциального закона распределения случайных величин. В связи с этим в следующем разделе с помощью имитационного моделирования.

### 3.5. Имитационное моделирование для проверки аналитических соотношений

В работе [44] была получена с помощью математической модели для СМО  $M/M/1$  зависимость квантиля от количества узлов коммутации, которая ведет себя линейно. Модель  $M/M/1$  является приближенной потому, что в пакетных сетях поток не пуассоновский и время обслуживания не экспоненциальное. Поэтому задача проверки состоит в анализе закономерностей полученных для модели  $M/M/1$  в более сложном случае.

Рассматриваемая модель состоит из 7 узлов коммутации на первый узел поступают *IP*-пакеты. Характер входящего потока определяется распределением Вейбулла с нагрузкой от 0,5 до 0,9. Это достигается путем регулирования параметров формы и масштаба распределения Вейбулла для разных коэффициентов вариации: 2, 5 и 10. На основе этих данных несложно установить значения для параметра распределения Вейбулла  $c = 0,543, 0,311$  и  $0,233$  соответственно [100].

На входы остальных узлов поступают заявки с выходов предшествующих узлов с вероятностью 0,333. Следует упомянуть, что на вход каждого узла поступают и другие потоки с разных источников при этом суммарная нагрузка на узел равна 0,5 Эрл.

Данные отображаются на гистограмме для различного количества узлов коммутации в рассматриваемой модели: 3, 5 и 7 узлов. Затем находится среднее значение задержки *IP*-пакетов для различного числа УК в зависимости от коэффициента вариации.

Результаты моделирования для показателя *IPTD* показывают, что он может быть аппроксимирован линейной функцией в зависимости от коэффициента вариации с хорошей точностью [100] – ошибка не превышает 10%. На рисунках 3.7 - 3.9 приведены зависимости среднего значения задержки *IP*-пакетов для различных УК в зависимости от коэффициента вариации. Данные, по которым построены графики, взяты из таблицы, приведенной в приложении 2.

Для рисунков 3.7 - 3.9 при  $\rho=0,9$  приведены границы доверительного интервала пунктирами линиями для доверительной вероятности 0,9.

Это свойство *IPTD*, полученное с использованием имитационного моделирования, позволяет выбрать простую линейную функцию, которая может быть использована для различных практических целей. Второе важное свойство, исследованное с помощью имитационной модели, – это эквивалентность зависимости для различного количества узлов коммутации. Этот факт позволяет использовать линейную модель в общем случае, то есть для любого маршрута в сети.

Данный подход не дает решение для нахождения *IPDV*, здесь как было отмечено выше нужно найти ФР, после чего следует численно решить уравнение  $S(t) = 0,999$ . Эту операцию нужно повторить для различного количества УК: 3, 5 и 7 при разных значениях коэффициента вариации – 2, 5 и 10. Зависимости вариации задержки IP-пакетов для различного количества УК в зависимости от коэффициента вариации приведены на рисунках 3.10 – 3.12. Данные, по которым построены графики, взяты из таблицы, приведенной в приложении 2 (таблица П. 2.6, П. 2.7 и П. 2.8 соответственно).

Результаты моделирования показывают, что вариация задержки увеличивается с ростом числа узлов, значение нагрузки и значения коэффициента вариации [100]. Для рисунков 3.10 – 3.12 при  $\rho=0,9$  приведены границы доверительного интервала пунктирами линиями для уровня значимости, равного 0,9.

Зависимости, приведенные на рисунках 3.10 – 3.12, обладают тем же свойством, что и графики для *IPTD*, т.е. изменение *IPDV* от коэффициента вариации для различного количества узлов подчиняется линейному закону, при этом относительная ошибка не превышает 10%.

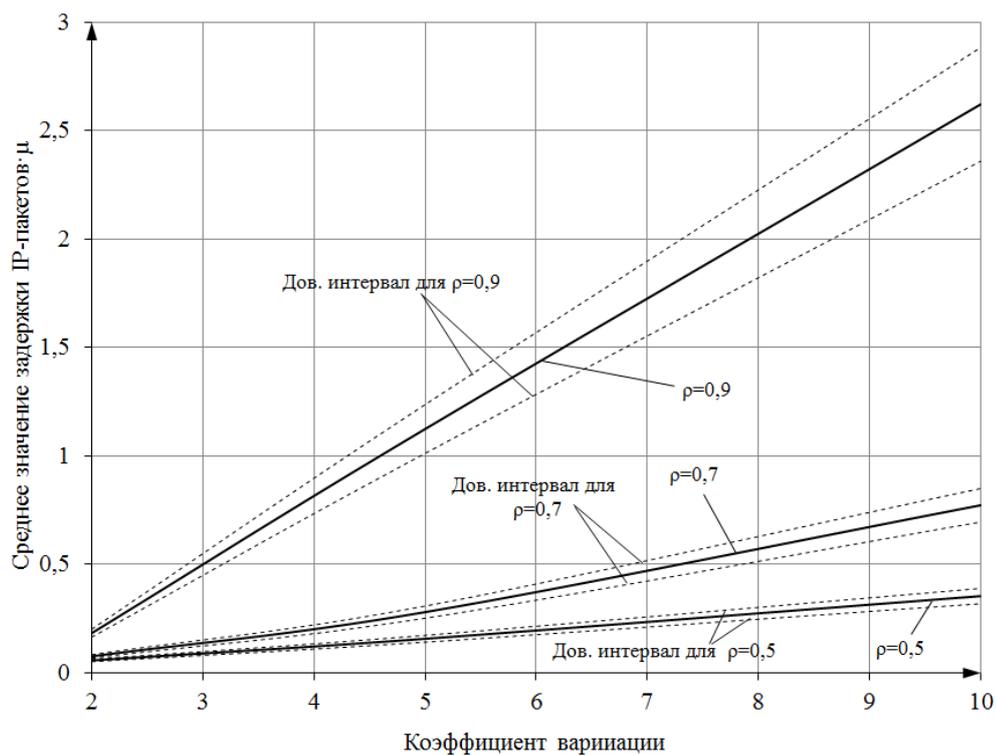


Рисунок 3.7 - Среднее значения задержки *IP*-пакетов при трех УК для разных значений коэффициента вариации 2, 5 и 10

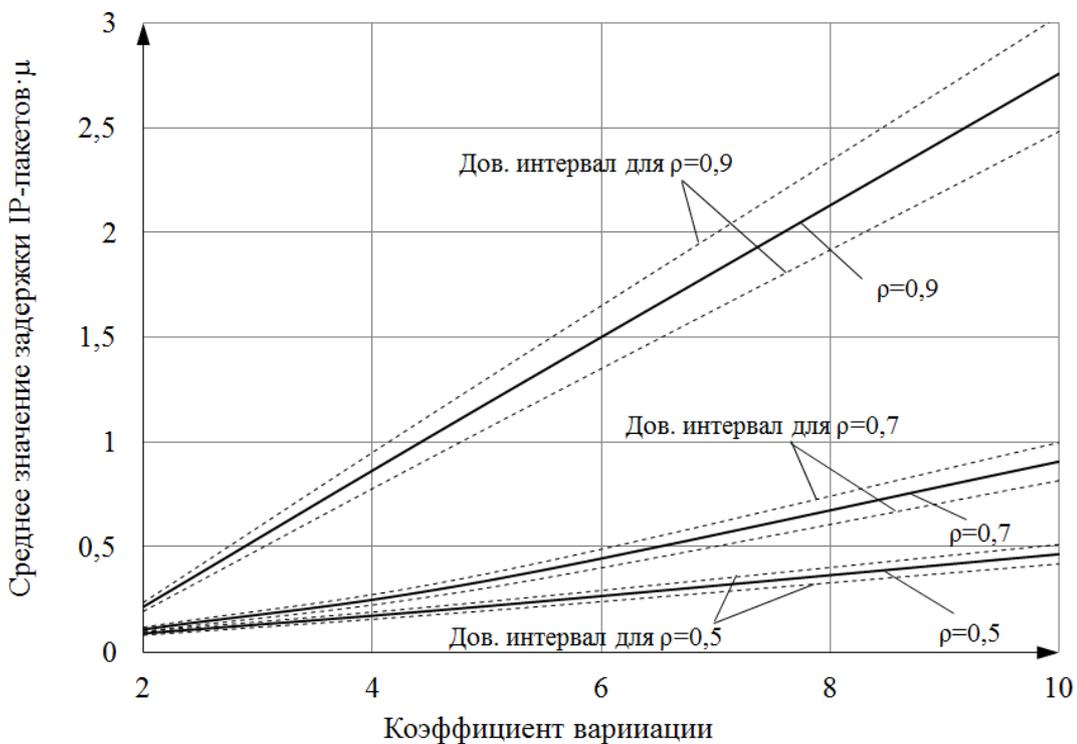


Рисунок 3.8 - Среднее значения задержки *IP*-пакетов при пяти УК для разных значений коэффициента вариации 2, 5 и 10

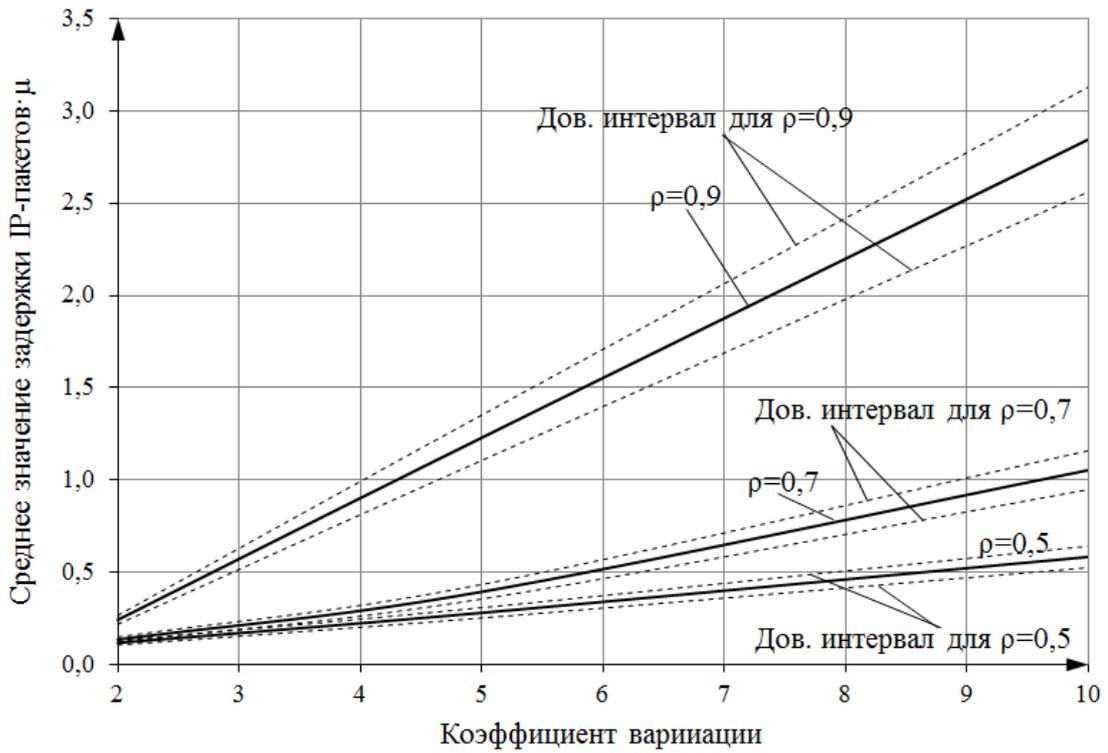


Рисунок 3.9 - Среднее значение задержки IP-пакетов при семи УК для разных значений коэффициента вариации 2, 5 и 10

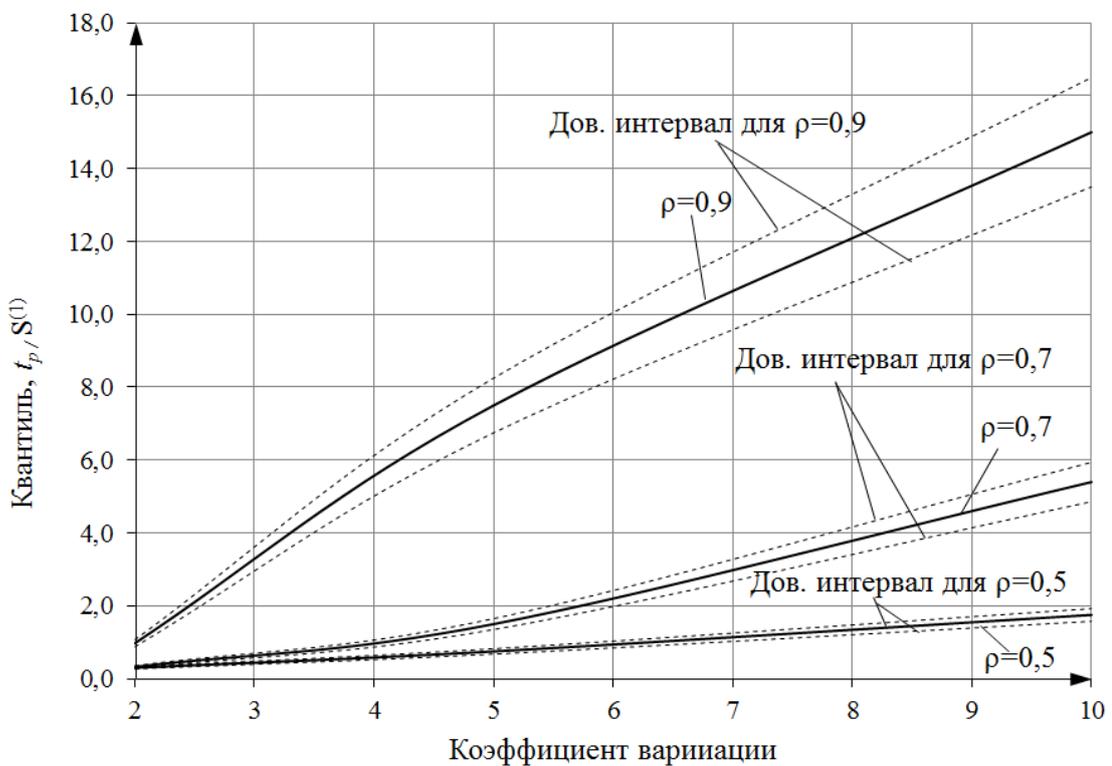


Рисунок 3.10 - Зависимости вариации задержки IP-пакетов при трех УК для разных значений коэффициента вариации 2, 5 и 10

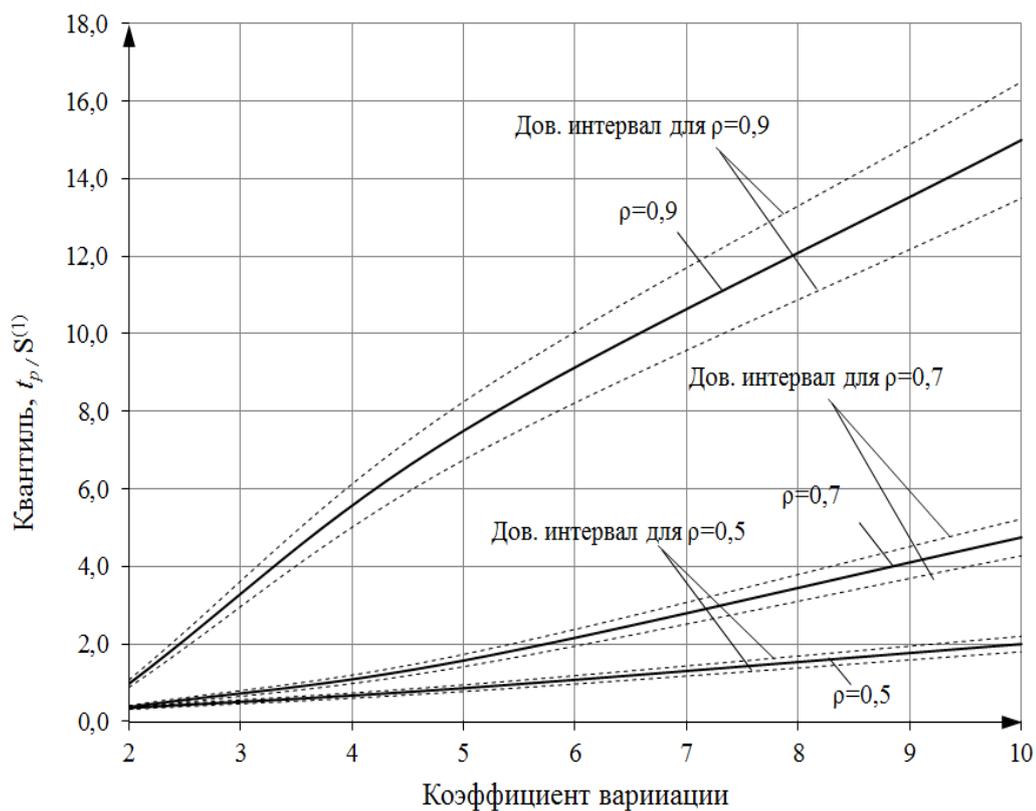


Рисунок 3.11 - Зависимости вариации задержки IP-пакетов при пяти УК для разных коэффициента вариации 2, 5 и 10

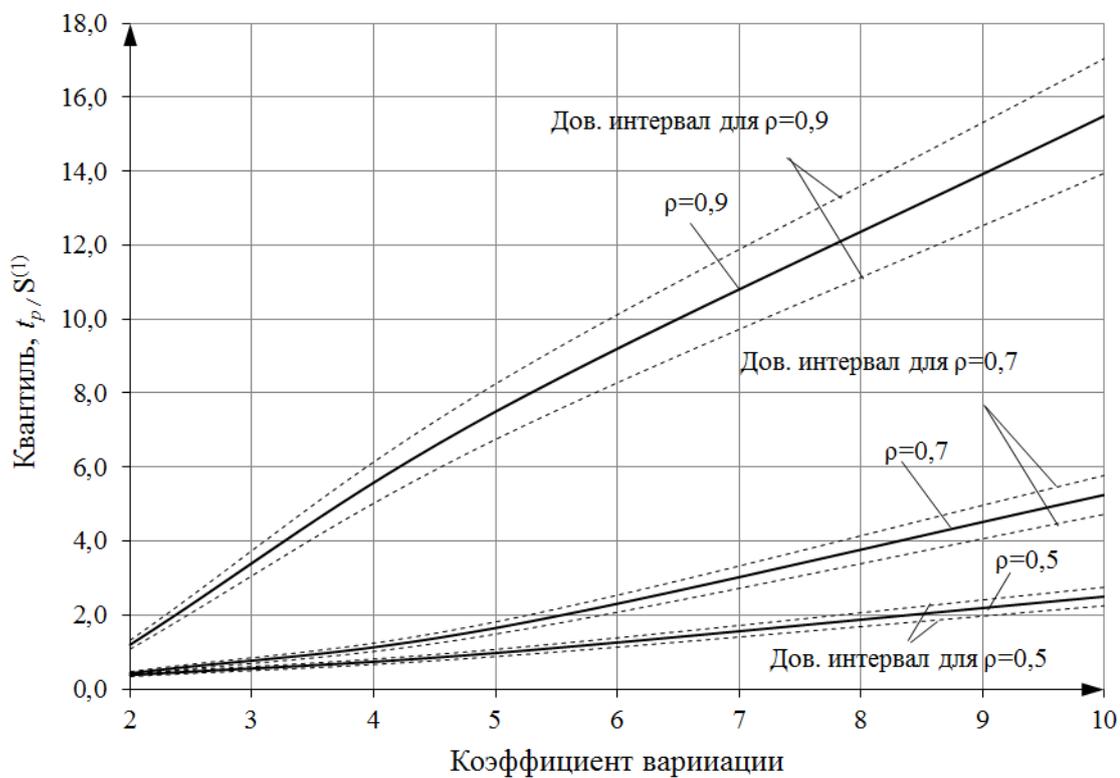


Рисунок 3.12 - Зависимости вариации задержки IP-пакетов при семи УК для разных коэффициента вариации 2, 5 и 10

## Выводы

1. В результате проведенного исследования предложен и обоснован метод декомпозиции показателя *IPDV* – вариации задержки *IP*-пакетов. Метод основан на приближенной оценке квантиля функции распределения времени задержки при обмене *IP*-пакетами между интерфейсами пользователь-сеть.

2. Установлено, что в области изменения параметров, представляющих практический интерес для построения и развития сетей класса *NGN*, величину *IPDV* можно рассматривать как линейную функцию от коэффициента вариации входящего потока *IP*-пакетов. Величина возникающей ошибки при использовании такой гипотезы находится в разумных пределах. При увеличении количества потоков *IP*-пакетов, поступающих на вход узла коммутации, возникающая ошибка снижается.

3. Выявлено качественное совпадение параметров *IPTD* и *IPDV* как функций от количества фаз обслуживания (размеров сети) и характеристик входящего потока *IP*-пакетов. Полученные результаты подтверждены при помощи методов имитационного моделирования. Для использования имитационного моделирования получены соотношения, которые позволяют определить необходимый объем испытаний.

4. Показано, что ряд Эджворта позволяет удачно аппроксимировать распределение времени задержки *IP*-пакетов в сетях класса *NGN*.

## Глава 4

### 4. Рекомендации по декомпозиции показателей *QoS* в сети класса *NGN*

#### 4.1. Особенности взаимоотношений операторов связи для поддержки

С широким внедрением мультисервисных сетей преобладающим должен стать подход к нормированию уровня качества обслуживания клиентов на основании требований со стороны самих абонентов к качеству предоставляемых услуг. С учетом требований абонентов оператор может формировать исходные параметры *QoS*, которые определяют требуемый уровень качества предоставления услуг. Оператору необходимо иметь возможность гарантировать этот уровень качества. Современный подход к определению гарантированного уровня качества заключается в разработке соглашений о качестве обслуживания (*SLA*) между оператором связи и теми пользователями (потребителями услуг), которые готовы оплачивать подобные возможности по более высоким тарифам.

Предоставление новых услуг подразумевает создание решений для их поддержки, управление услугами и обеспечение их высокого качества. Одним из главных моментов при этом является техническое обеспечение заданного уровня *QoS*. Это касается как реализации необходимой скорости передачи данных в сети абонентского доступа, так и обеспечения требуемого качества обслуживания трафика в пределах магистральной сети.

Также важной задачей, от решения которой во многом зависит успешное предоставление услуг, является задача управления. В рамках концепции построения *NGN* этот компонент сетей также претерпел значительные изменения. Оператору, кроме инфраструктуры самой *NGN*, необходимо создавать новую или совершенствовать уже используемую систему управления сетью. Это связано с пересмотром приоритетов среди задач управления. Если раньше для управления сетью было необходимо управлять работой оборудования, то сегодня на первый план выходит управление услугами связи и качеством их предоставления.

Кроме этого, к задачам управления следует отнести поддержку бизнеса оператора – не только обеспечение взаимодействия диспетчера с клиентом (техническая поддержка), но и гибкая тарификация услуг (передача различных видов трафика с учетом требований *SLA*, поддержание большого количества тарифных планов, скидок и т.д.).

Следовательно, с позиций управления услугами можно сформулировать ряд требований, которым должна отвечать сеть оператора связи:

- предоставление абоненту возможности выбора услуг из их широкого набора услуг;
- обеспечение гибкого управления услугами, как со стороны потребителя услуг, так и со стороны провайдера;
- определение перечня параметров *SLA*, методов и механизмов их контроля;
- гарантирование оператором связи гибкости и точности систем учета и расчетов за услуги.

В соответствии с рекомендацией *ITU-T G.1000* (Качество обслуживания средств связи: структура и определения) и документа *ETSI EG (202 009-3 V1.2.1 (2007-01) Качество телекоммуникационных услуг; Часть 3: Шаблон для соглашения об уровне обслуживания (SLA))* под понятие "качество обслуживания", наряду с техническими показателями предоставления услуги, попадает также и качество взаимоотношений абонента с оператором связи. Под этим понимается следующее:

- предварительная понятная рекламная информация о предоставляемом спектре услуг;
- ясность и гибкость контракта пользователя с представителями оператора;
- возможность организации линии к абоненту и подключение ее к сети;
- обеспечение безопасности обмена информацией абонента;
- организация эффективных служб помощи абонентам и минимизация времени ответа справочной службы;
- точность счетов на оплату потребляемых услуг.

Из вышесказанного видно, что в современных сетях произошло изменение понятия "Качество услуги" и смещение акцентов в сторону маркетинга. Значительное

место отводится нетехническим аспектам взаимоотношений оператора и абонента. Основные задачи заключаются в соединении услуг связи с грамотной тарифной и маркетинговой политикой оператора, которая сможет принести максимальную прибыль оператору.

Заключение *SLA* – наилучшее средство для удовлетворения конкретных требований по *QoS* при обеспечении оптимального соотношения стоимость/качество, как для пользователя, так и для поставщика услуг. Кроме того, целью *SLA* является определение общего качества процесса управления, используемого поставщиком услуг и клиентом, в том числе:

- управление повреждениями;
- сбор статистики для проведения профилактики;
- использование статистики.

Оператор связи, заключающий *SLA* с потребителем услуг, гарантирует обеспечение определенного уровня качества. Однако, качество предоставления услуги, как правило, зависит от нескольких взаимодействующих друг с другом операторов связи, через сети которых проходит маршрут доставки данных. Следовательно, операторы должны определить такой механизм взаимодействия, при котором обеспечивается гарантируемое качество предоставления услуги. При этом могут применяться разные подходы. Например, возможно определить равные нормативы для сетей всех операторов, участвующих в предоставлении услуги, которые обеспечивают выполнение норматива по доставке данных из конца в конец.

Однако такой подход не всегда применим. В общем случае, техническое оснащение и возможности сетей связи различных операторов могут быть различны. Это приводит к тому, что показатели качества обслуживания трафика в сетях разных операторов могут быть не идентичны. Поэтому, уравнивательный подход может привести к дополнительным расходам некоторых операторов, которые не будут восполнены доходами от предоставления услуги. В ряде случаев такое распределение нормативов может привести к необоснованно высокому качеству обслуживания, которое не востребовано пользователями, а ряде случаев выполнение норматива может быть вообще невозможно, например, когда маршрут в сети одного из операторов

проходит по кабельной линии связи, а в сети другого оператора по спутниковому каналу.

Таким образом, при распределении (декомпозиции) нормативов качества обслуживания нужно допускать возможность достаточно широкого диапазона изменения качества обслуживания в рамках сети каждого из операторов. При этом норматив качества обслуживания на участке *UNI-UNI* выполняется при различной степени участия операторов. При этом оператор, в сети которого, норматив не выполняется "заимствует" ресурсы сети другого оператора, в сети которого качество обслуживания выше. При этом декомпозиция показателей качества является не только технической, но и экономической задачей, при решении которой необходимо учитывать расходы и доходы операторов при совместной работе по предоставлению услуг связи.

#### **4.2. Принципы учета затрат оператора связи на поддержку *QoS***

Сети связи следующего поколения продолжают формироваться, заменяя системы передачи и коммутации, использующие технологию коммутации каналов. Одна из особенностей сетей связи следующего поколения заключается в обслуживании мультисервисного трафика, для которого нормированы специфические (по сравнению с системами на базе технологии коммутации каналов) качественные показатели. Одна из актуальных задач в области исследования показателей *QoS* – распределение норм, заданных для интерфейсов пользователь-сеть, между сетями.

Эту задачу следует рассматривать как с технической, так и с экономической точек зрения. Данное утверждение основано на том, что затраты операторов связи могут заметно различаться. Следовательно, должны различаться и доходы, которые получают операторы связи при оказании услуг пользователям.

Рекомендация *ITU-T Y.1542* [84] не содержит принципы распределения доходов. По этой причине в работе [42] предложено разработать правила перераспределения доходов между операторами связи, которые участвуют в предоставлении услуги и должны совместно обеспечивать выполнение показателей *QoS*. Их нормативные значения приведены в тексте рекомендации *ITU-T Y.1541*.

В рекомендации *ITU-T Y.1542* предложена модель, которая подразумевает участие сетей трех поставщиков (операторов связи) в организации маршрута обмена IP-пакетами между двумя интерфейсами *UNI*. Эта модель была показана на рисунке 1.7. Интерфейсы пользователь-сеть обозначены аббревиатурой *UNI*.

На рисунке 4.1 приведен типовой вариант маршрута *UNI-UNI*, проходящего через сети трех операторов связи. Рассмотрим распределение норматива задержки доставки данных. Распределение данного норматива включает три основных этапа:

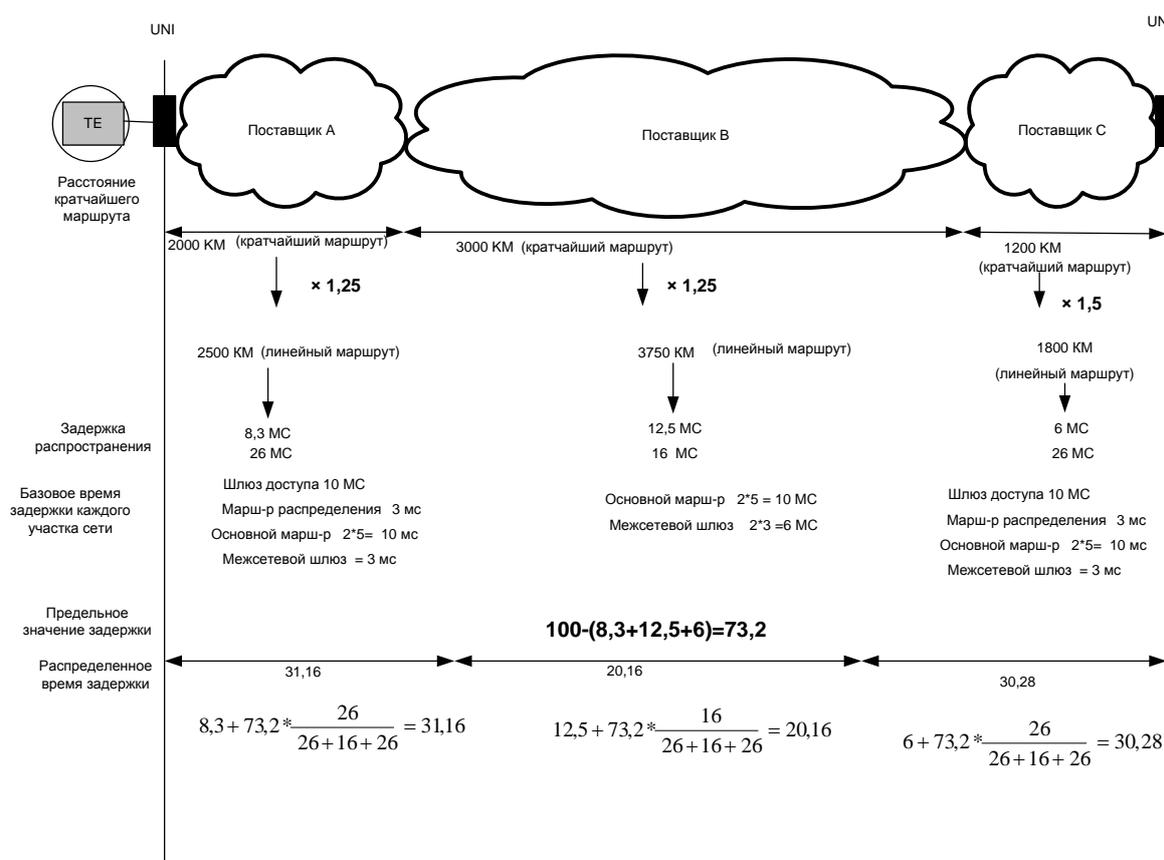


Рисунок 4.1 - Декомпозиция *IPTD* в сетях трех операторов связи

1. Оценка физических характеристик сетей операторов связи. На этом этапе оцениваются следующие параметры.

а) Протяженность каждого из участков сети и задержка распространения сигнала на этих участках. Если при оценке протяженности участка сети исходят из расстояния между точками начала и конца участка, то согласно [81], в качестве расстояния принимается несколько большая величина, коэффициенты "удлинения" маршрута определяются согласно [81]. Задержка распространения вычисляется ум-

ножением полученной длины участка на скорость распространения электромагнитного сигнала, которая, согласно [2], округляется в большую сторону до величины 5 мс на 1000 км. Для маршрута на рисунке 4.1 получены значения задержки распространения сигнала каждого из трех операторов связи 8,3 мс; 12,5 мс и 6 мс соответственно.

б) Технический состав оборудования сетей операторов связи. При этом рассматривают лишь узлы сети и их назначение. Каждый из узлов, в зависимости от выполняемой им задачи, вносит ту или иную величину задержки. Величины, выбираемые в качестве задержки для узлов различного назначения, рекомендованы в [91]. В данном случае предполагалось, что маршрут проходит через 4 узла в сети оператора А, через два узла в сети оператора В и через 4 узла в сети оператора С. Задержки, вносимые узлами, определены согласно [91] и составляют 10 мс, 3 мс, 10 мс и 3 мс в сети Оператора А; 10 мс и 6 мс в сети оператора В и 10 мс, 3 мс, 10 мс и 3 мс в сеть и оператора С. Для маршрута на рисунке 4.1 получены значения задержки в сетях каждого из трех операторов связи 26 мс; 16 мс и 26 мс соответственно.

2. Декомпозиция показателя *IPTD*. На этом этапе вычисляют следующие величины.

а) Допустимая величина задержки в сетях операторов связи без учета времени распространения сигнала. При существующей норме на величину *IPTD* равной 100 мс, для маршрута (рисунок 4.1) эта величина составляет 73,2 мс.

б) Оценивается допустимая величина задержки в сетях каждого из операторов связи как сумма времени распространения сигнала в сети и доли допустимой величины задержки, которая принимается прямо пропорциональной доле задержки в сети каждого из операторов, вычисленной в пункте 1. Для рассматриваемого маршрута получены значения задержки в сетях каждого из трех операторов связи 31,16 мс; 20,16 мс и 30,28 мс соответственно.

В качестве примера использования методики [84] рассмотрим распределение норм на задержку доставки пакета между тремя фрагментами сети, участвующими в предоставлении услуги связи. В данных примерах будем полагать, что первый и третий фрагменты – это участки местной (городской или сельской) связи. Они

включают в себя сети агрегации и доступа. Второй фрагмент – это магистральная (междугородная) сеть.

Выбранная для примера модель характерна для большинства случаев взаимодействия Операторов связи. Рассмотрим два случая, которые могут иметь место для сетей связи Российской Федерации. Первый случай – второй фрагмент имеет среднюю протяженность равную 1000 км; модель представлена на рисунке 4.2. Во втором случае второй фрагмент имеет максимальную протяженность (например, между Калининградом и Хабаровском), равную 10000 км. Расстояние выбрано с учетом того, что кабельные линии связи проходят не по кратчайшим расстояниям между городами, модель представлена на рисунке 4.3.

Полагаем, что скорость распространения сигнала близка к скорости света в свободном пространстве. При скорости распространения света 299792458 м/с и длине линии связи 100 км, задержка распространения составил примерно 0,3 мс, что на два порядка меньше существующих нормативов. Поэтому, в выбранных моделях для сетей местной связи (доступ и агрегация), которые достаточно малую протяженность линий связи, временем распространения сигнала будем пренебрегать, полагая его равным нулю. Также полагаем, что маршрут в сети доступа и агрегации содержат в своем составе узел доступа и маршрутизатор, вносимые которыми задержки, согласно [84] равны 10 мс и 3 мс, соответственно. Маршрут в сети оператора магистральной связи содержит маршрутизатор и два межсетевых шлюза, которые вносят задержки 2 мс, каждый.

Два приведенных примера демонстрируют, как изменяются требования к задержке при изменении протяженности маршрута.

В первом случае требование к задержке в магистральной сети, без учета времени распространения сигнала, равно 16,69 мс, а к сети доступа и агрегации – 36,17 мс. Во втором случае требование к задержке в магистральной сети, без учета времени распространения сигнала, равно 8,25 мс, а к сети доступа и агрегации – только 17,88 мс.

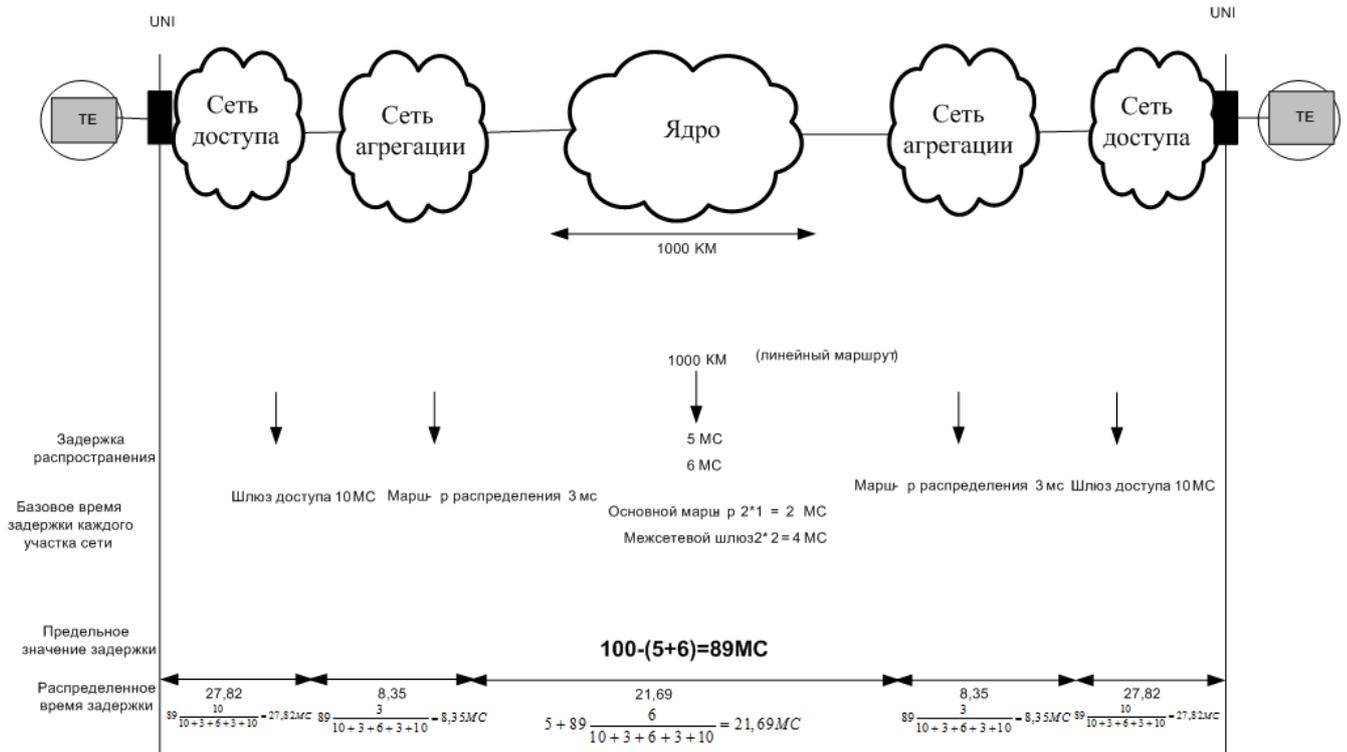


Рисунок 4.2 – Декомпозиция *IPTD* при протяженности второго фрагмента 1000 км

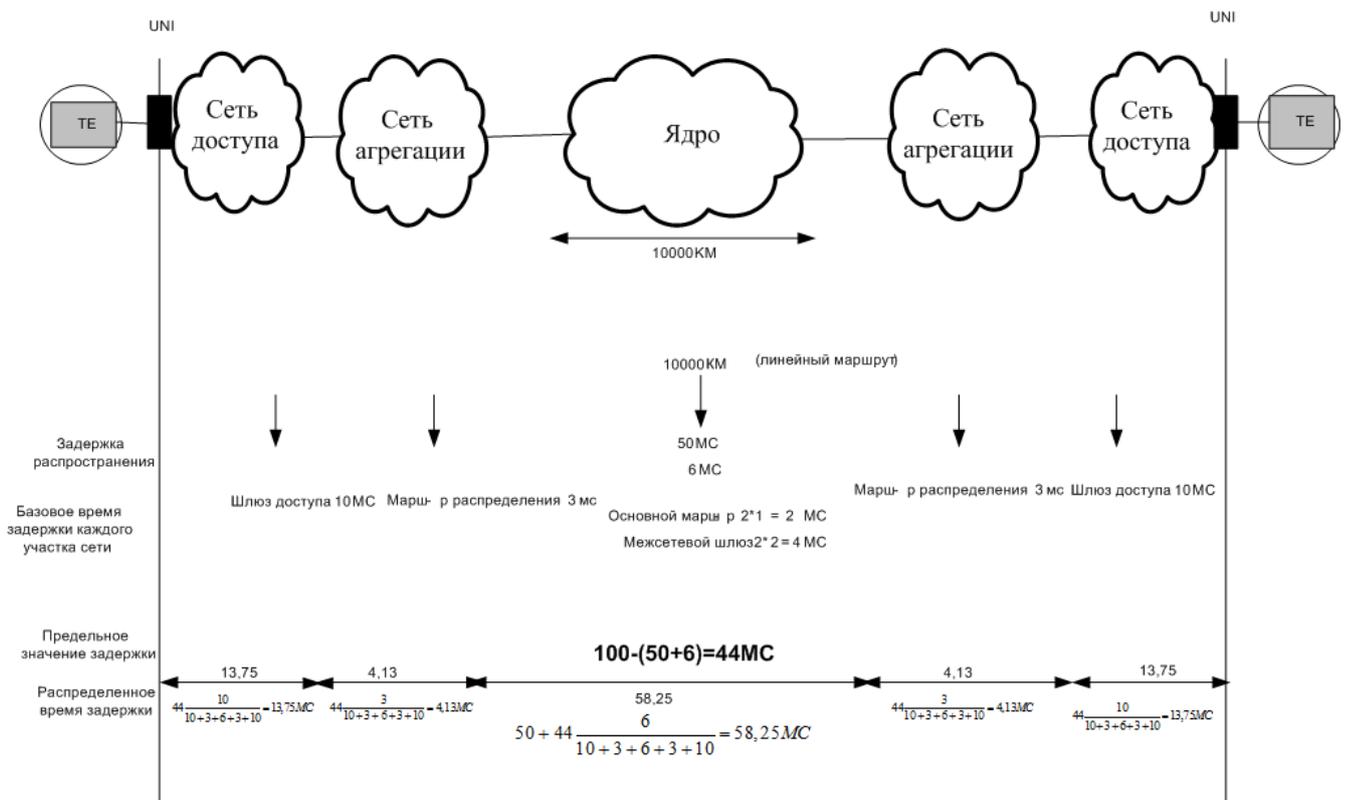


Рисунок 4.3 – Декомпозиция *IPTD* при протяженности второго фрагмента 10000 км

Как видно из приведенных примеров, требование к задержке изменяется в равной степени, как для местных сетей, так и для магистральной сети. В данном примере, требования к задержке, вносимой оборудованием, уменьшились во втором случае в 2,02 раза для сетей всех операторов.

Первый из нормированных показателей  $QoS$  – среднее время переноса  $IP$ -пакетов между интерфейсами  $UNI$ . Оно обозначается как  $IPTD$  (*IP packet transfer delay*). Исследование принципов декомпозиции всех показателей  $QoS$ , проведенной специалистами МСЭ-Т показало, что достаточно найти рациональный способ распределения величины  $IPTD$ . Распределение других показателей может быть выполнено аналогичным образом [55]. Тогда рассматриваемая задача может быть сформулирована в следующей форме:

Задача для маршрута обмена  $IP$ -пакетами через сети трех операторов "А", "В" и "С" может быть сформулирована следующим образом:

- Известны величины  $T_A$ ,  $T_B$  и  $T_C$ , представляющие собой распределение показателя  $IPTD$  статическим методом, который предложен в рекомендации *ITU-T Y.1542*. Данный метод основан на соблюдении равенства  $IPTD = T_A + T_B + T_C$ .

Необходимо найти приемлемое правило как основу для распределения доходов между операторами связи. Доли доходов этих операторов обозначаются далее как  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$ . Очевидно, что  $r_A + r_B + r_C = 1$ .

Прилагательное "приемлемое" введено для того, чтобы подчеркнуть существенное для практической работы условие: распределение доходов между операторами связи осуществляется посредством переговорного процесса. По этой причине расчет величин  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$  должен дать только базу для переговорного процесса. Это означает, что решение задачи не обязательно рассматривать как поиск оптимума.

Для начала необходимо найти связь между затратами операторов связи ( $C_A$ ,  $C_B$  и  $C_C$ ) и ресурсами, которыми располагают созданные ими сети. Ресурсы уместно выразить через производительность используемых узлов коммутации –  $G_A$ ,  $G_B$  и  $G_C$ . Затратами на транспортные ресурсы можно пренебречь, учитывая устойчивую тен-

денцию к снижению их стоимости [57]. В монографии [56] на основании обработки статистических данных для технологии "коммутация каналов" определена зависимость затрат оператора связи от производительности, позволяющая записать следующие соотношения, используя коэффициент пропорциональности  $\xi$ :

$$C_A \approx \xi \sqrt[3]{G_A}, C_B \approx \xi \sqrt[3]{G_B}, C_C \approx \xi \sqrt[3]{G_C}, \quad (4.1)$$

$$C \approx \xi (\sqrt[3]{G_A} + \sqrt[3]{G_B} + \sqrt[3]{G_C}) \quad (4.2)$$

По всей видимости, похожая зависимость будет справедлива и для технологии "коммутация пакетов". Очевидно, что цифру "3" придется заменить другой величиной, обозначаемое ниже буквой  $k$ :

$$C \approx \xi (\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}). \quad (4.3)$$

Численное значение величины  $k$  могут легко определить все операторы связи за счет анализа экономических показателей используемых технических средств. Логично предположить, что доля дохода каждого оператора связи должна быть пропорциональна его затратам. Это позволяет определить искомые величины  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$  в такой форме:

$$\begin{aligned} r_A &\approx \frac{\sqrt[k]{G_A}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}, \\ r_B &\approx \frac{\sqrt[k]{G_B}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}, \\ r_C &\approx \frac{\sqrt[k]{G_C}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Если предположить, что каждая фаза обслуживания IP-пакетов представима моделью класса  $M/M/1$  [27], то величины  $G_A$ ,  $G_B$  и  $G_C$  можно выразить, введя коэффициент пропорциональности  $\alpha$  следующим образом:

$$G_A = \frac{\alpha}{T_A}, G_B = \frac{\alpha}{T_B}, G_C = \frac{\alpha}{T_C}. \quad (4.5)$$

Соотношения (4.5), на самом деле, справедливы и для моделей более общего вида [27, 66]. Формулы (4.4) можно привести к такому виду:

$$\begin{aligned} r_A &\approx \frac{T_A^{-1/k}}{T_A^{-1/k} + T_B^{-1/k} + T_C^{-1/k}}, \\ r_B &\approx \frac{T_B^{-1/k}}{T_A^{-1/k} + T_B^{-1/k} + T_C^{-1/k}}, \\ r_C &\approx \frac{T_C^{-1/k}}{T_A^{-1/k} + T_B^{-1/k} + T_C^{-1/k}}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Предлагаемый методологический подход можно распространить и на те ситуации, когда один из операторов связи не может выполнить ограничение на среднее время переноса IP-пакетов в границах своей сети. Предположим, что для маршрута обмена IP-пакетами в отношении задержек  $t_A$ ,  $t_B$  и  $t_C$  справедливы следующие условия:

$$t_A = T_A, \quad t_B > T_B, \quad t_C < T_C. \quad (4.7)$$

Для сохранения нормы на показатель *IPTD* оператор *B* может "одолжить время" у оператора *C*. Величина задержки  $x_C$ , которая допустима в сети оператора *C*, определяется очевидным образом:

$$x_C = IPTD - t_A - t_B. \quad (4.8)$$

Доля доходов оператора *A* не должна меняться. По этой причине принципы расчета величины  $r_A$  не меняются:

$$r_A \approx \frac{T_A^{-1/k}}{T_A^{-1/k} + T_B^{-1/k} + T_C^{-1/k}}. \quad (4.9)$$

Это означает, что для оператора  $A$  принципы распределения доходов не меняются. Оставшуюся часть доходов, доля которых равна  $I - r_A$ , делят между собой операторы  $B$  и  $C$ , руководствуясь такими соотношениями:

$$\begin{aligned} r_B &\approx \frac{t_B^{-1/k}}{t_B^{-1/k} + x_C^{-1/k}}, \\ r_C &\approx \frac{x_C^{-1/3}}{t_B^{-1/k} + x_C^{-1/k}}. \end{aligned} \tag{4.10}$$

Следует еще раз подчеркнуть, что выражения, полученные для величин  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$ , предназначены для использования операторами связи как приближенные оценки для проведения переговоров и заключения договоров о распределении доходов.

Предлагаемый метод распределения доходов между операторами связи учитывает реальные затраты каждого участника телекоммуникационного рынка, необходимые для обеспечения нормированных показателей QoS. Важная особенность правила распределения доходов между операторами связи заключается в том, что невозможность обеспечения заданных норм на одном участке маршрута обмена IP-пакетами между двумя интерфейсами пользователь-сеть может быть компенсирована за счет экономических механизмов. Иными словами, не всегда требуется модернизация конкретной сети связи, если заданная норма между интерфейсами пользователь-сеть обеспечивается.

Соотношения, приведенные выше, могут использоваться и для перераспределения доходов в границах сети одного оператора связи. В модели, показанной на рисунке 1.7, видно, что технические средства операторов связи  $A$  и  $C$  разделены на два компонента – сегмент доступа и региональный сегмент. В ряде случаев распределение доходов между этими сегментами может оказаться полезным.

#### 4.3. Рекомендации по декомпозиции показателей QoS

На основании положений, изложенных выше, процедуру декомпозиции показателей  $IPTD$ ,  $IPDV$  и  $IPLR$  при взаимодействии  $N$  операторов можно условно разде-

лить на несколько этапов. Они показаны в виде алгоритма, приведенного на рисунке 4.4.

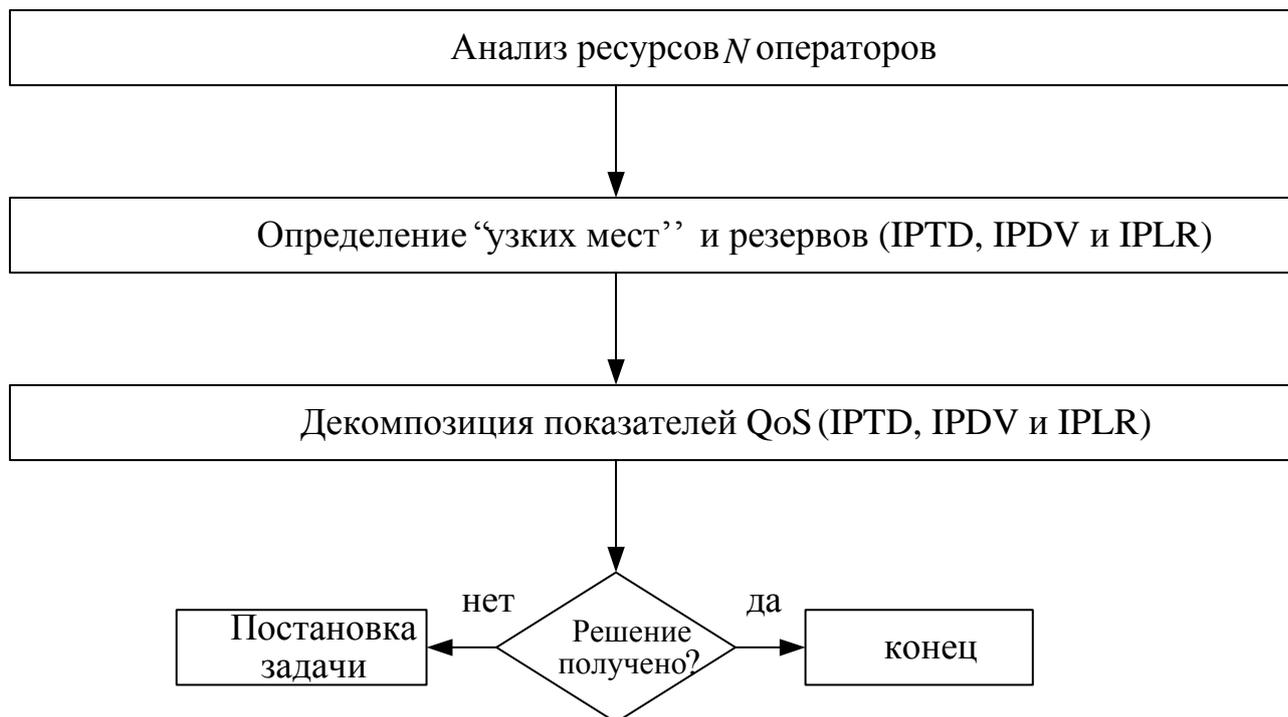


Рисунок 4.4 - Алгоритм декомпозиции *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* между *N* операторами связи

Анализ ресурсов операторов предполагает сбор и анализ данных о коммуникационных ресурсах и их параметрах, таких как протяженность маршрута в рамках сетей каждого из операторов, пропускная способность линий связи и производительность узлов коммутации.

Определение "узких мест" и резервов ресурсов предполагает сбор и анализ данных об обслуживаемом операторами связи трафике, таких как набор предоставляемых услуг, интенсивность трафика, использование ресурсов операторов (интенсивность нагрузки). Результатом анализа является оценка показателей качества обслуживания трафика. Следует отметить, что эта оценка может быть получена как с помощью аналитических моделей, так и путем проведения соответствующих измерений. Под "узким местом" будем понимать сеть оператора связи или ее участок, который не обеспечивает необходимого уровня качества обслуживания трафика. Под имеющимся резервом будем ресурсы сети оператора связи, качество обслужи-

вания трафика в которой выше установленного норматива. Таким образом, в результате анализа получают данные, на основе которых можно оценить возможность обслуживания трафика при взаимодействии  $N$  операторов связи с заданным уровнем качества и вклад каждого из операторов в обеспечение этого.

Декомпозиция показателей качества включает в себя распределение норматива *IPTD* и *IPLR* и оценку необходимости "заимствования" или "кредитования" ресурсов в сетях взаимодействующих операторов связи. Например, если, согласно модели *Y.1542*, нормативные значения обеспечиваются в сетях всех операторов, то нет необходимости прибегать к "заимствованию" или "кредитованию" ресурсов. В случае, когда норматив на участке *UNI-UNI* не выполняется, также не выполняется норматив в сети одного или нескольких операторов, необходимо распределить показатели *IPTD* и *IPLR* таким образом, чтобы обеспечить норматив *UNI-UNI*. При этом обеспечение нормативов будет обеспечиваться за счет "заимствования" ресурсов операторов, сети которых обеспечивают более высокое качество обслуживания. В этом случае необходимо оценить коэффициенты, позволяющие перераспределить между операторами связи доходы от предоставления услуги.

Рекомендации по декомпозиции показателей качества *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* основаны на следующие положения:

1. Для построения математической модели маршрута обмена IP-пакетами может быть использована модель многофазной системы массового обслуживания.

2. В качестве модели фазы обслуживания, при моделировании *IPTD* могут быть выбраны модели СМО  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  и  $G/G/1$  при условии независимости процессов поступления трафика на различных фазах обслуживания.

3. В качестве модели для оценки потерь IP-пакетов на маршруте обмена могут быть использованы СМО  $M/M/1/k$ ,  $M/D/1/k$  и  $G/G/1/k$  при условии независимости потоков на различных фазах обслуживания. При существенном отличии параметров реальной СМО от аналитических моделей для оценки квантиля функции распределения может быть использован ряд Эджворта.

4. Для проверки условия независимости фаз обслуживания необходимо оценить число независимых потоков, поступающих на входы узлов в сетях операторов связи.

5. При анализе ресурсов операторов необходимо получить данные о ресурсах УК и других параметрах, таких как протяженность маршрута в рамках сетей каждого из операторов, пропускная способность линий связи.

6. Для определения "узких мест" и резервов ресурсов рекомендуется использовать данные об интенсивности трафика, обслуживаемого сетями операторов связи, такие как набор предоставляемых услуг, интенсивность трафика, использование ресурсов операторов.

7. Для декомпозиции показателей качества рекомендуется произвести оценку необходимости "заимствования" или "кредитования" ресурсов в сетях взаимодействующих операторов связи. Если согласно нормативные значения обеспечиваются в сетях всех операторов, то нет необходимости прибегать к "заимствованию" или "кредитованию" ресурсов. В случае, когда норматив на участке *UNI-UNI* не выполняется, необходимо распределить показатели *IPTD* и *IPLR* таким образом, чтобы обеспечить норматив *UNI-UNI*. В этом случае необходимо оценить коэффициенты, позволяющие перераспределить между операторами связи доходы от предоставления услуги.

## 5. Выводы

1. Предложен и обоснован методологический подход к распределению доходов, получаемых операторами, которые участвуют в поддержке услуги между интерфейсами *UNI*. Этот подход основан на учете тех затрат, которые приходятся на сети операторов, задействованных в оказании телекоммуникационных или информационных услуг. Следует учесть, что рекомендуемый подход представляет собой техническое обоснование для разработки экономических решений.

2. Сформулированы рекомендации по декомпозиции показателей качества обслуживания *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*. Данные рекомендации представляют собой перечень операций, которые следует выполнить всем участникам телекоммуникацион-

ного рынка для обеспечения нормированных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика.

3. Разработан алгоритм для проведения декомпозиции показателей качества обслуживания *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*. Предлагаемый алгоритм включает перечень сравнительно простых операций для решения задач, связанных с декомпозицией показателей качества обслуживания *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*, заданных для сетей связи следующего поколения.

## Заключение

В диссертационной работе проведены исследования, позволяющие рационально выполнить декомпозицию показателей качества в сети *NGN*. Основные результаты исследований заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ подходов к декомпозиции показателей *QoS*. Сделан вывод о том, что задача декомпозиции показателей *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* в настоящее время решена не полностью, так как содержащиеся в рекомендациях *ITU-T* методы декомпозиции не всегда учитывают особенности и интересы операторов связи. Предложена и обоснована аналитическая и имитационная модели маршрута обмена *IP*-пакетами. Эти модели адекватно отображают те процессы функционирования сети *NGN*, которые важны с точки зрения декомпозиции показателей *QoS*. Для выбранных моделей выполнен анализ характера входящего трафика и механизма его обработки.

2. Разработан метод декомпозиции для средней задержки доставки пакетов данных (показатель *IPTD*). На основании анализа результатов имитационного моделирования доказано, что при увеличении количества потоков уменьшается зависимость разных фаз обслуживания друг от друга и снижается относительная ошибка в оценках величин задержки доставки. Это позволяет использовать для оценки показателя *IPTD* предложенное соотношение, выраженное в аддитивной форме.

3. Разработан метод декомпозиции для вероятности потери пакетов данных (показатель *IPLR*). Показано, что для оценки показателя *IPLR* может быть использовано выражение, которое представлено в мультипликативной форме. Результаты проведенного имитационного моделирования доказывают справедливость подхода, выбранного в диссертационной работе.

4. Разработан метод декомпозиции вариации задержки *IP*-пакетов (показатель *IPDV*). Метод основан на приближенной оценке квантиля функции распределения времени задержки при обмене *IP*-пакетами между интерфейсами пользователь-сеть. Установлено, что в области изменения параметров, представляющих практический интерес для построения и развития сетей класса *NGN*, величину *IPDV* можно рас-

сма́тривать как линейную функцию от коэффициента вариации входящего потока IP-пакетов. Выявлено совпадение законов изменения параметров *IPTD* и *IPDV* как функций от коэффициента вариации, количества фаз обслуживания (размеров сети) и характеристик входящего потока IP-пакетов. Полученные результаты подтверждены при помощи методов имитационного моделирования. Уточнен способ оценки квантиля распределения задержки IP-пакетов за счет использования разложения Эджворта.

5. Сформулированы предложения по принципам взаимоотношений операторов связи для поддержки *QoS* между интерфейсами пользователь-сеть. Данные предложения основаны на оценке задействованных ресурсов операторов связи с учетом их затрат и доходов. Предлагаемая процедура перераспределения доходов основана на примерных аналитических соотношениях, отражающих затраты операторов связи на ресурсы сети. Предложен алгоритм для практического проведения декомпозиции показателей качества обслуживания *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*. Предлагаемый алгоритм включает перечень сравнительно простых операций для решения поставленных задач.

Результаты диссертации использованы в Севере-Западном филиале ПАО "ГИПРОСВЯЗЬ" при разработке ряда проектов по созданию сетей класса *NGN*, а также включены в учебный процесс кафедры «Инфокоммуникационные системы» СПбГУТ. Реализация результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

## 6. Список сокращений

- ВВХ – Вероятностно-временные характеристики
- ВОС – Модель взаимодействия открытых систем
- ВНТП – Ведомственные нормы технологического проектирования
- ИПС – Интерфейс пользователь-сеть
- МСЭ – Международный союз электросвязи
- НТП – нормы технологического проектирования
- СеМО – Сеть массового обслуживания
- СМО – Система массового обслуживания
- ТА – Телефонный аппарат
- ТфОП – Телефонная сеть общего пользования
- УК – Узел коммутации
- FIFO – First in first out* (первым пришел – первым обслужен)
- IP – Internet Protocol* (протокол межсетевого взаимодействия)
- IPDV – IP packet delay variation* (вариация задержки *IP* пакетов)
- IPER – IP packet error ratio* (доля искаженных *IP* пакетов)
- IPLR – IP packet loss ratio* (доля потерянных *IP* пакетов)
- IPTD – IP packet transfer delay* (задержка переноса *IP* пакетов)
- NGN – Next Generation Network* (сеть следующего поколения)
- QoE – Quality of Effort* (Качество восприятия)
- QoS – Quality of Service* (качество обслуживания)
- SDH – Synchronous Digital Hierarchy* (синхронная цифровая иерархия)
- SG – Signalling Gateway* (шлюз сигнализации)
- SLA – Service Level Agreement* (соглашение об уровне обслуживания)
- SP – Signaling Point* (пункт сигнализации)
- UNI- User to Network Interface* (Интерфейс пользователь-сеть)
- VoIP – Voice over IP* (*IP*-телефония)

## Список литературы

1. *Бакланов И.Г.* NGN: принципы построения и организации. /– М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
2. *Балькин Г., Михайлов В., Москалец В., Хиленко В.* Киевская городская сеть: переход на пакеты. – Сети и телекоммуникации, № 1 – 2, 2004.
3. *Башарин Г.П.* Лекции по математической теории телетрафика. – М.: Издательство Российского университета дружбы народов, 2007. – 268с.
4. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных. – М. Мир. 1989. – 544 с.
5. *Битнер В.И., Попов Г.Н.* Нормирование качества телекоммуникационных услуг. – М.: "Горячая линия – Телеком", 2004. – 312 с.
6. *Боев В.Д.* Исследование адекватности GPSSWorld и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов. –: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.
7. *Боев В. Д.* Моделирование систем. Инструментальные средства GPSSWORLD. Учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.
8. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 608 с.
9. *Вадзинский Р.Н.* Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
10. *Ван дер Варден Б.Л.* Математическая статистика. – М., ИЛ, 1960. – 436 с.
11. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 576 с.
12. *Гольдштейн Б.С., Кучерявый А. Е.* Сети связи пост-NGN. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.
13. *Гольдштейн Б. С., Маршак М. А., Мишин Е. Д., Соколов Н. А. и Тум А. В.* Показатели функционирования мультисервисной сети связи общего пользования, Журнал "Техника Связи" // №3-4/2009. – С.25-31.
14. *Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г.* Сети связи: Учебник для ВУ-Зов. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.

15. Гольдштейн Б.С. Системы коммутации. Санкт-Петербург, БХВ, 2003. – 314 с.
16. Гольдштейн Б.С., Гойхман В.Ю., Столповская Ю.В. Сети NGN. Оборудование IMS : Учебное пособие. – М. : “Теледом”, ГОУВПО СПбГУТ, 2010. – 56 с.
17. Гольдштейн Б.С., М.А. Маршак, Е.Д. Мишин, Н.А. Соколов и А.В. Тум. Аспекты контроля показателей функционирования, установленных для сети связи общего пользования // Журнал "Техника Связи" 2009 – №2. – С.24-34.
18. Гулевич Д.С. Сети связи следующего поколения. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 640 с.
19. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи /– М.: Связь, 1977. – 360 с.
20. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. /– М.: Наука, 1971. – 288 с.
21. Ефимушкин В.А., Ледовских Т.В., Куликова Т.А. Керженцев Ю.А., Червяков О. В. Особенности оценки качества услуг сети подвижной радиотелефонной связи // Т-Сотт – телекоммуникации и транспорт № 7 / 2013. – С.47-52.
22. Жожикашвили В.А., Вишневецкий В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ / М.: Радио и связь, 1988. – 192 с.
23. Замощин О.С., Левин В.А. SLA–основа взаимопонимания между абонентом и Оператором // Вестник связи. – № 8. 2011. – С.47-52.
24. Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений / М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
25. Ивницкий В.А., Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. / – М.: Издательство Физматлит, 2004. – 772 с.
26. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. / М. Кендалл, А. Стьюарт – М.: Наука, 1966. – 566 с.
27. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. / М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
28. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. / М.: Мир, 1979. – 600 с.
29. Комашинский В.И, Осадчий А.И., Соколов Н.А. Стратегические аспекты модернизации сетей электросвязи. – Вестник связи, 2012, №4, С. 69 – 72.

30. *Крамер Г.* Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
31. *Кучерявый А.Е., Парамонов А.И.* Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта. ФГУП ЦНИИС, 2008. – 275 с.
32. *Кучерявый Е.А.* Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
33. *Кучерявый А.Е.* Конвергенция сетей связи как основа функциональной архитектуры систем коммутации // ForumInternationalTelecommunication Academy'98. Proceedings. – М.: April 14-16, 1998. – 3 с.
34. *Кучерявый А.Е., Цуприков А.Л.* Сети связи следующего поколения / – М.: Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС), 2006. – 278 с.
35. *Леваков А.К.* Приближенный анализ характеристик сети NGN при существенном росте трафика. – Электросвязь. – 2011. – №12. – С.20-21.
36. *Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д.* Теория телетрафика/ Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1979. – 224 с.
37. *Мохаммед А.А.С.* Анализ метода декомпозиции показателей качества обслуживания трафика для NGN // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании", № 64, Материалы, СПб., 20-24 февраля 2012. – С.180-181.
38. *Мохаммед А.А.С.* Анализ метода декомпозиция показателей качества обслуживания трафика, предложенного ITU-T // 3-й Научно-технической школы-семинара "инфокоммуникационные технологии в цифровом мире": Сборник докладов, СПб. 21–22 ноября 2013. – С.11-12.
39. *Мохаммед А.А.С.* Аппроксимация распределения времени задержки IP-пакетов в сети следующего поколения // Санкт-Петербургская организация Общероссийской общественной организации "Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова" (СПБНТОРЭС). 69-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, Труды конференции, СПб. 17–25 апрель 2014. – С.172-173.

40. *Мохаммед А.А.С.* Два основных варианта декомпозиции показателей качества обслуживания в сети NGN // 2-ая Международная научно техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании": сборник научных статей, СПб. 26-27 февраля 2013. – С.146-167
41. *Мохаммед А.А.С.* Метод оценки вариации задержки в пакетных сетях // Электросвязь. – 2014. – № 10. – С. 48 - 49.
42. *Мохаммед А.А.С., Соколов Н.А.* Методы декомпозиции показателей QoS для NGN// Вестник связи. – 2014. – №6. – С. 44-45.
43. *Мохаммед А.А.С.* Распределение доходов операторов мультисервисных услуг: Учет QoS // Первая миля. – 2015. – № 1. – С. 48-50.
44. *Мохаммед А.А.С.* Задача декомпозиции показателя *IPDV*, установленного для сети следующего поколения, Вестник бурятского государственного университета, выпуск математика, информатика. 2014. – 9(1) – С. 48-50.
45. *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* 0-54 Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2010. — 944 с.
46. *Парамонов А.И.* Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования, Дис. ... докт. Техн. Наук: 05.12.13 – Санкт-Петербург, 2014. – 317 с.
47. *Парамонов А.И., В.Д. Нестеренко, А.Е. Кучерявый.* Стратегия развития сетей связи на основе новых технологий // Электросвязь. – 2001. №1. – С. 25 - 27.
48. *Рыжиков Ю.И.* Теория очередей и управления запасами. – СПб: Питер, 2001. — 384 с.
49. *Семенов Ю.В.* Проектирование сетей связи следующего поколения. – Санкт-Петербург, Наука и техника, 2005. – 240 с.
50. *Симонина О.А., Яновский Г.Г.* Характеристики трафика в сетях IP. – Труды учебных институтов связи / СПбГУТ, № 172, СПб.: 2004. – С. 8 - 14.
51. *Симонина О.А.* Расчет параметров качества обслуживания сетей нового поколения / 56-я НТК ППС: материалы / СПбГУТ. СПб, 2004. – С. 20.

52. *Соколов А.Н.* Методы анализа задержек IP-пакетов в сети следующего поколения, Дис. ... канд. Техн. Наук: 05.12.13 – Санкт-Петербург, 2011. – 317 с.
53. *Соколов А.Н., Соколов Н.А.* Однолинейные системы массового обслуживания. – Учебное пособие, СПбГУТ, 2010. – 110 с.
54. *Соколов Н. А.* Задачи перехода к сети связи следующего поколения, Дис. ... докт. Техн. Наук: 05.12.13 – Санкт-Петербург, 2006. – 312 с.
55. *Соколов Н.А.* Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи, 2012. – 432 с.
56. *Соколов Н.А.* Сети абонентского доступа. Принципы построения. – Пермь, "Энтер-профи", 1999. – 254 с.
57. *Соколов Н.А.* Телекоммуникационные сети. Часть 2 "Городские и сельские транспортные сети" – М.: Альварес Пабблишинг, 2003. – 128 с.
58. *Степанов, С.Н.* Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 391 с.
59. *Фаерберг О.И., Шварцман В.О.* Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005. – 125 с.
60. *Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В.* Моделирование информационных систем. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
61. *Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В.* Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 479 с.
62. *Шнепс – Шнеппе, М.А.* О соглашениях SLA в условиях NGN и услуг Triple Play // Электросвязь. – 2006. - №3. – С. 19 – 21.
63. *Шнепс – Шнеппе, М.А.* Системы распределения информации. Методы расчета / М.: Связь. - 1979. – 344 с.
64. *Шнепс, М.А. Рогинский В.Н., Харкевич А.Д., Шнепс М.А. и др.* Теория сетей связи: Учебник для вузов связи / Под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и Связь, 1981. – 192 с.

65. Штермер Х. И др. Теория телетрафика. Основы расчета систем проводной связи. Перевод с немецкого под редакцией Г.П. Башарина. М.: Связь, 1971. – 319 с.
66. Штойян Д. Качественные свойства и оценки стохастических моделей. – М.: Мир, 1979. – 270 с.
67. Яновский, Г. Кох Р. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001. – 280 с.
68. Boswarthick D., Hersent O., Elloumi O. M2M Communications. – Wiley, 2012. – 232 P.
69. Burke, P.J. The Output of a Queuing System. Operations Research 4 (6): 1956. P.699–704.
70. ETSI. EG 202 009-3 V1.1.1.Part 3:Template for Service Level Agreements (SLA), 2002. – 25 P.
71. ETSI. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Networks (TIPHON) Release 3; End-to-end Quality of Service in TIPHON Systems; Part 2: Definition of Speech Quality of Service (QoS) Classes. – TS 101 329-2, 2002.-01. 2002. – 11 P.
72. ETSI. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Networks (TIPHON) Release 3; End-to-end Quality of Service in TIPHON Systems; Part 7: Design guide for elements of a TIPHON connection from end-to-end speech transmission performance point of view. – TR 101 329-7, 2002-02. 2002. – 72 P.
73. Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. The Internet of Things. Wiley, 2012. –370 P.
74. <http://www.nsnam.org/>
75. <http://www.riverbed.com/>
76. <http://enmn.ppf/>
77. ITU-T Y. 2012. Functional requirements and architecture of the NGN., Recommendation, Geneva. - April 2010. – 87 P.
78. ITU-T. Charging and accounting principles for NGN. Recommendation D.271. – Geneva, 2008. – 16 P.

- 79.*ITU-T*. Description of capability set 1 of NGN release 1. Recommendation Y.2006, 2008. – 20 P.
- 80.*ITU-T*. Digital exchange performance design objectives. Recommendation Q.543. – Helsinki, 1993. – 36 P.
- 81.*ITU-T*. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. Recommendation G.826, 2002. – 24 P.
- 82.*ITU-T*. Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths at or above the primary rate. Recommendation G.826. – Geneva, 1999. – 23 P.
- 83.*ITU-T*. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. Recommendation E.802. – Geneva, 2007. – 29 P.
- 84.*ITU-T*. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. Recommendation Y.1542. – Geneva, 2010. – 22 P.
- 85.*ITU-T*. General overview of NGN. Recommendation Y.2001. – Geneva, 2004. – 10 P.
- 86.*ITU-T*. General principles and general reference model for Next Generation Networks. Recommendation Y.2011, 2004. – 26 P.
- 87.*ITU-T*. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model common text with ISO/IEC. Recommendation X.200. – Geneva, 1994. – 57 P.
- 88.*ITU-T*. Internet Protocol Data Communication Service – IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters. Recommendation Y.1540. – Geneva, 2011. – 43 P.
- 89.*ITU-T*. IP access network architecture. Recommendation Y.1231. – Geneva, 2000. – 13 P.
- 90.*ITU-T*. Measurements in IP networks for inter-domain performance assessment. Recommendation Y.1543. – Geneva, 2008. – 35 P.
- 91.*ITU-T*. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2011. – 55 P.

- 92.*ITU-T*. New system for accounting in international telephony. Recommendation D.150. – Geneva, 1999. – 14 P.
- 93.*ITU-T*. Parameters for TCP connection performance in the presence of middleboxes. Recommendation Q.543. – Geneva, 2004. – 36 P.
- 94.*ITU-T*. Reference connections for traffic engineering of IP access networks Recommendation E.651. – Geneva, 2000. – 7 P.
- 95.*ITU-T*. The E-model: a computational model for use in transmission planning. Recommendation G.107 – Geneva, 2015. – 22 P.
- 96.*ITU-T*. Triple-play Services. Quality of Experience (QoE) Requirements. TR-126, 2006. – 115 P.
- 97.*ITU-T*. Vocabulary for performance and quality of service. Recommendation P.10/G.100. – Geneva, 2006. – 33 P.
- 98.*ITU-T*. Network grade of service parameters and target values for circuit-switched services in the evolving ISDN. Recommendation E.721. – Geneva, 1999. – 5 P.
- 99.*Lianyong Qi, Xiaona Xia, Jiancheng Ni, Chunmei Ma, Yanxue Luo*. A Decomposition-based Method for QoS-aware Web Service Composition with Large-scale Composition Structure, SERVICE COMPUTATION: The Fifth International Conferences on Advanced Service Computing, 2013. P.81-86.
- 100.*Mohammed A.A.C*. Investigation of decomposition of quality indexes standardized for the Next Generation Network // T-comm. – 2014. - № 8. – P.106-107.
- 101.*Raje, R.R. ; Olson, A.M. ; Bryant, B.R. ; Burt, C. ; Auguston, M. ; Zhisheng Huang*, Composition and decomposition of quality of service parameters in distributed component-based systems, Algorithms and Architectures for Parallel Processing, 2002. Proceedings. Fifth International Conference on 23-25 Oct. 2002. – P.273-276.
- 102.*Seitz N*. ITU-T QoS Standards for IP-Based Networks // IEEE Communication Magazine, Jun., 2003. – P.82-89.
- 103.*Villy B. Iversen*, Teletraffic engineering, handbook, itu-d SG 2/16 & ITC. 2001. – 305 P.

## **Приложение 1. Сведения об использовании результатов исследований**

1. Акт об использовании научных результатов диссертационной работы Мохаммеда А.А.С. "Методы декомпозиции показателей качества обслуживания трафика в сети следующего поколения" в Северо-Западном филиале ПАО "ГИПРОСВЯЗЬ". В частности, "Методы декомпозиции основных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика (*IPTD*, *IPDV*, и *IPLR*)" .
2. Акт об использовании научных результатов диссертационной работы Мохаммеда А.А.С. "Методы декомпозиции показателей качества обслуживания трафика в сети следующего поколения" в учебном процессе кафедры Инфокоммуникационных систем при СПбГУТ.

# ГИПРОСВЯЗЬ

ОПЫТ МАСШТАБ ПЕРСПЕКТИВА

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ГИПРОСВЯЗЬ»  
Северо-западный филиал  
улица Прилуцкая, д. 35, г. Санкт-Петербург, Россия, 192007  
тел: (812) 406-6607, факс: (812) 406-6608  
www.giprosvyaz.ru, mail@giprosvyaz-sz.ru

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
– директор Северо-Западного филиала,  
кандидат технических наук  
В.О. Пяттаев



Акт

об использовании научных результатов диссертационной работы Мохаммеда А.А.С.  
"МЕТОДЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА  
В СЕТИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ", представленной на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в следующем составе:

- Цуприков А.Л., заместитель директора филиала по научной деятельности, к.т.н.;
- Осипов А.Е., главный специалист информационно-аналитического отдела,

составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Мохаммедом Ала Абдулрахманом Саидом в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, были использованы в Северо-Западном филиале ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ». В частности, «Методы декомпозиции основных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика (IPTD, IPDV и IPLR)» применены при разработке следующих проектных решений:

- Строительство сети доступа Wi-Fi. Организация ядра Wi-Fi для публичного доступа в Интернет по технологии Wi-Fi на территории объектов недвижимости Уральского Федерального округа и Пермского края;
- Расширение мультисервисной сети МРФ «Сибирь» ОАО «Ростелеком» 2014».

Члены комиссии:

А.Л. Цуприков

А.Е. Осипов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,  
д. 61, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,  
Санкт-Петербург, 193232  
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159  
E-mail: rector@sut.ru  
ИНН 7808004760 КПП 784001001  
ОГРН 1027809197635 ОКТМО 40909000

20.06.2016 № 1493/48  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,  
кандидат технических наук, доцент



К.В. Дукельский

#### АКТ

об использовании научных результатов,  
полученных Мохаммедом Ала Абдулрахманом Саидом

Комиссия в составе:

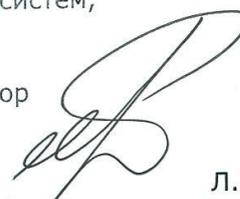
- Бузюкова Л.Б., кандидата технических наук, профессора, декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем, заведующего кафедрой программной инженерии и цифровой вычислительной техники,
- Гольдштейна Б.С, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой инфокоммуникационных систем,
- Гойхмана В.Ю., кандидата технических наук, доцента кафедры инфокоммуникационных систем

составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Мохаммедом Ала Абдулрахманом Саидом, а именно:

1. Методы декомпозиции нормируемых показателей качества обслуживания мультисервисного трафика по отдельным компонентам сети следующего поколения,

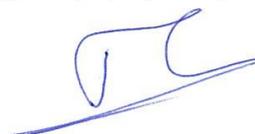
2. способ оценки квантиля распределения задержки заявок в пакетной сети за счет использования разложения Эджворта при представлении компонентов сети в виде систем массового обслуживания  
использованы в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по направлению 11.04.02 дисциплина "Математические методы расчета инфокоммуникационных систем" в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Декан факультета инфокоммуникационных сетей и систем,  
заведующий кафедрой программной инженерии и  
цифровой вычислительной техники, к.т.н., профессор



Л.Б. Бузюков

Зав. кафедры инфокоммуникационных систем, д.т.н., профессор



Б.С. Гольдштейн

Доцент кафедры инфокоммуникационных систем, к.т.н.



В.Ю. Гойхман

## Приложение 2. Результаты вспомогательных расчетов

Таблица П.2.1. Зависимость относительной ошибки задержки от количеств потоков и доверительные интервалы.

$\rho$		Количество потоков			
		1	2	3	6
<b>0,5</b>	$\delta$	0,389	0,042	0,042	0,032
	$-\Delta$	0,181	0,072	0,042	0,017
	$+\Delta$	0,271	0,108	0,063	0,025
<b>0,6</b>	$\delta$	0,452	0,035	0,035	0,017
	$-\Delta$	0,209	0,063	0,031	0,009
	$+\Delta$	0,314	0,095	0,047	0,014
<b>0,7</b>	$\delta$	0,510	0,109	0,034	0,027
	$-\Delta$	0,310	0,101	0,053	0,017
	$+\Delta$	0,464	0,152	0,079	0,026
<b>0,8</b>	$\delta$	0,615	0,042	0,025	0,008
	$-\Delta$	0,315	0,062	0,024	0,005
	$+\Delta$	0,472	0,093	0,036	0,007
<b>0,9</b>	$\delta$	0,674	0,274	0,098	0,087
	$-\Delta$	0,471	0,204	0,125	0,054
	$+\Delta$	0,707	0,305	0,187	0,081

Таблица П.2.2. Зависимость относительной ошибки потери от количеств потоков и доверительные интервалы.

$\rho$		Количество потоков			
		1	2	3	6
<b>0,5</b>	$\delta$	0,255	0,245	0,473	0,116
	$-\Delta$	0,229	0,221	0,425	0,104
	$+\Delta$	0,280	0,270	0,520	0,127
<b>0,6</b>	$\delta$	0,391	0,067	0,431	0,343
	$-\Delta$	0,352	0,061	0,388	0,308
	$+\Delta$	0,430	0,074	0,474	0,377
<b>0,7</b>	$\delta$	0,563	0,150	0,036	0,013
	$-\Delta$	0,506	0,135	0,032	0,012
	$+\Delta$	0,619	0,165	0,039	0,014
<b>0,8</b>	$\delta$	0,548	0,243	0,085	0,049
	$-\Delta$	0,493	0,218	0,076	0,044
	$+\Delta$	0,603	0,267	0,093	0,054
<b>0,9</b>	$\delta$	0,545	0,121	0,044	0,045

	- $\Delta$	0,490	0,109	0,040	0,040
	+ $\Delta$	0,599	0,133	0,049	0,049
<b>0,97</b>	$\delta$	0,505	0,165	0,094	0,022
	- $\Delta$	0,454	0,149	0,084	0,020
	+ $\Delta$	0,555	0,182	0,103	0,024

Таблица П.2.3. Среднее значения задержки IP-пакетов для трех УК при разных значений коэффициента вариации 2, 5, 10 и доверительные интервалы.

	Среднее значение задержки при разных коэффициентах вариации								
	2			5			10		
$\rho$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$
<b>0,5</b>	0,057	0,063	0,051	0,157	0,173	0,141	0,354	0,389	0,319
<b>0,6</b>	0,064	0,070	0,058	0,189	0,208	0,170	0,499	0,549	0,449
<b>0,7</b>	0,076	0,084	0,068	0,280	0,308	0,252	0,773	0,850	0,696
<b>0,8</b>	0,103	0,113	0,093	0,359	0,395	0,323	1,165	1,282	1,049
<b>0,9</b>	0,183	0,201	0,165	1,125	1,238	1,013	2,623	2,885	2,361

Таблица П. 2.4. Среднее значения задержки IP-пакетов для пяти УК при разных значений коэффициента вариации V=2, 5 и 10

	Среднее значение задержки при разных коэффициентах вариации								
	2			5			10		
$\rho$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$	$T$	+ $\Delta$	- $\Delta$
<b>0,5</b>	0,087	0,096	0,078	0,217	0,239	0,195	0,465	0,512	0,419
<b>0,6</b>	0,094	0,103	0,085	0,247	0,272	0,222	0,635	0,699	0,572
<b>0,7</b>	0,106	0,117	0,095	0,338	0,372	0,304	0,907	0,998	0,816
<b>0,8</b>	0,133	0,146	0,120	0,416	0,458	0,374	1,278	1,406	1,150
<b>0,9</b>	0,214	0,235	0,193	1,184	1,302	1,066	2,758	3,034	2,482

Таблица П. 2.5. Среднее значения задержки IP-пакетов для семи УК при разных значений коэффициента вариации 2, 5, 10 и доверительные интервалы.

<b>ρ</b>	<b>Среднее значение задержки при разных коэффициентах вариации</b>								
	<b>2</b>			<b>5</b>			<b>10</b>		
	<i>T</i>	+Δ	-Δ	<i>T</i>	+Δ	-Δ	<i>T</i>	+Δ	-Δ
<b>0,5</b>	0,117	0,129	0,105	0,280	0,308	0,252	0,583	0,641	0,525
<b>0,6</b>	0,124	0,136	0,112	0,307	0,338	0,276	0,676	0,744	0,608
<b>0,7</b>	0,135	0,149	0,122	0,394	0,433	0,355	1,053	1,158	0,948
<b>0,8</b>	0,162	0,178	0,146	0,470	0,517	0,423	1,420	1,562	1,278
<b>0,9</b>	0,242	0,266	0,218	1,229	1,352	1,106	2,845	3,130	2,561

Таблица П. 2.6. вариация задержки IP-пакетов для трех УК при разных коэффициента вариации V=2, 5, 10 и доверительные интервалы.

<b>ρ</b>	<b>Значение квантиля при разных коэффициентах вариации</b>								
	<b>2</b>			<b>5</b>			<b>10</b>		
	<i>t<sub>p</sub></i>	+Δ	-Δ	<i>t<sub>p</sub></i>	+Δ	-Δ	<i>t<sub>p</sub></i>	+Δ	-Δ
<b>0,5</b>	0,3	0,33	0,27	0,75	0,825	0,675	1,75	1,925	1,575
<b>0,6</b>	0,225	0,2475	0,2025	0,975	1,0725	0,8775	2,265	2,4915	2,0385
<b>0,7</b>	0,325	0,3575	0,2925	1,5	1,65	1,35	5,4	5,94	4,86
<b>0,8</b>	0,5	0,55	0,45	2,125	2,3375	1,9125	6,75	7,425	6,075
<b>0,9</b>	0,975	1,0725	0,8775	7,5	8,25	6,75	15	16,5	13,5

Таблица П. 2.7. вариация задержки IP-пакетов для пяти УК при разных коэффициентах вариации V=2, 5,10 и доверительные интервалы для  $\rho=0,9$

	Значение квантиля при разных коэффициентах вариации								
	2			5			10		
$\rho$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$
<b>0,5</b>	0,350	0,385	0,315	0,862	0,948	0,776	2,000	2,200	1,800
<b>0,6</b>	0,300	0,330	0,270	1,050	1,155	0,945	3,000	3,300	2,700
<b>0,7</b>	0,375	0,413	0,338	1,575	1,733	1,418	4,750	5,225	4,275
<b>0,8</b>	0,550	0,605	0,495	2,125	2,338	1,913	7,125	7,838	6,413
<b>0,9</b>	0,975	1,073	0,878	7,500	8,250	6,750	15,000	16,500	13,500

Таблица П. 2.8. вариация задержки IP-пакетов для семи УК при разных коэффициентах вариации V=2, 5,10 и доверительные интервалы.

	Значение квантиля при разных коэффициентах вариации								
	5			5			5		
$\rho$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$	$t_p$	$+\Delta$	$-\Delta$
<b>0,5</b>	0,375	0,413	0,338	0,975	1,073	0,878	2,500	2,750	2,250
<b>0,6</b>	0,325	0,358	0,293	1,125	1,238	1,013	3,375	3,713	3,038
<b>0,7</b>	0,425	0,468	0,383	1,650	1,815	1,485	5,250	5,775	4,725
<b>0,8</b>	0,500	0,550	0,450	2,125	2,338	1,913	7,500	8,250	6,750
<b>0,9</b>	1,200	1,320	1,080	7,500	8,250	6,750	15,500	17,050	13,950