

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на кафедре инфокоммуникационных систем

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник **Соколов Николай Александрович**, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного унитарного предприятия "Центральный научно-исследовательский институт связи" – ЛО ЦНИИС.

Официальные оппоненты:

Комашинский Владимир Ильич, доктор технических наук, доцент, Заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской Академии Наук"

Ефимушкин Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. Заместителя генерального директора по научной работе Федерального государственного унитарного предприятия "Центральный научно-исследовательский институт связи".

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I".

Защита состоится 8 декабря 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Московский технический университет связи и информатики" по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория. А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://srd-mtuci.ru/index.php/ru/council> МТУСИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 219.001.04

кандидат технических наук, доцент

Максим Валерьевич Герешонок

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Важнейшими характеристиками функционирования и одними из набора критериев принятия технических решений при построении и эксплуатации систем и сетей связи являются показатели качества обслуживания. В современных сетях связи определены параметры, значения которых следует контролировать в эксплуатируемых сетях или оценивать, используя аналитические либо имитационные модели. 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. Международный союз электросвязи, 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 и соглашениям об уровне обслуживания.

Показатели качества обслуживания мультисервисного трафика для сети следующего поколения – *NGN (Next Generation Network)* нормированы между интерфейсами пользователь-сеть (*UNI* в англоязычной технической литературе). Для решения задач по поддержке показателей качества обслуживания мультисервисного трафика в *NGN* необходимо распределить нормированные величины по основным элементам телекоммуникационной системы.

Декомпозиция (распределение) показателей *QoS* должна обеспечивать выполнение нормативов, учитывая особенности сетей связи операторов и их интересы. Решению данной задачи 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* предлагается методика декомпозиции показателя

IPTD – среднего значения задержки доставки пакетов. Этот подход не в полной мере учитывает интересы и возможности операторов, участвующих в поддержке услуг. Методы декомпозиции других, не менее важных, показателей качества, таких как вариация задержки доставки пакета данных (*IPDV*), вероятность потерь пакетов (*IPLR*) в нормативных и рекомендательных документах практически не рассматриваются. Существует ряд работ, посвященных подобным вопросам, но они не подходят для сетей класса *NGN* из-за различия технологий передачи и коммутации.

Задачи построения *NGN* и анализ характеристик 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*) авторов. Однако в настоящее время не существует методов декомпозиции показателей качества, которые, обеспечивая выполнение требуемых норм качества, позволяли бы учесть особенности технических средств операторов связи, а также их интересы.

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

Цель работы и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в исследовании моделей функционирования сети *NGN* и составлении на базе полученных результатов методики декомпозиции показателей *QoS*.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе 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 (показатель *IPDV*);
- Развитие метода декомпозиции для вероятности потери пакетов данных (показатель *IPLR* в рекомендациях *ITU-T*);

- Формирование предложений по принципам взаимоотношений операторов связи для поддержки показателей QoS ;

Научная новизна. Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

1. 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;

2. Разработан 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. Разработан 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;

3. 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 и *Microsoft office Excel* 2007. Имитационное моделирование маршрута пропуска трафика в IP-сети выполнено с помощью пакета моделирования *AnyLogic*.

Основные 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;
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 результатами имитационного моделирования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 67-й и 69-й конференциях СПбНТОРЭС им. А.С. Попова. (Санкт-Петербург, 2013, 2014), I Международной научно-технической и научно-методической конференции "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании", № 64 (Санкт-Петербург, 2012), II Международной научно-технической и научно-методической конференции "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании" (Санкт-Петербург, 2013), 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 рекомендованные ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 статья в журнале, включенном в РИНЦ, и 4 тезиса докладов в материалах научных конференции.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассмотрено 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 дальнейших исследований, набора показателей QoS в сети класса NGN , результатов исследований в части декомпозиции показателей QoS . Обоснована актуальность запланированных исследований. Определены общие принципы их проведения.

Актуальность диссертационной работы обоснована, в основной мере, тем, что статический метод, который наиболее полно проработан *ITU-T*, иногда приводит к избыточности ресурсов, создаваемых рядом операторов связи. Эта избыточность, свойственная статическому методу, приводит к росту тарифов на телекоммуникационные услуги, что неблагоприятно сказывается на конкурентоспособности операторов связи.

Во второй главе предложена и обоснована математическая модель маршрута обмена IP -пакетами между интерфейсами UNI . Она представляет собой многофазную систему массового обслуживания (СМО), в которую поступают заявки различного типа. Различие в типах заявок объясняется тем, что сеть NGN обслуживает мультисервисный трафик, всегда представленный в форме IP -пакетов. В общем случае каждый из узлов коммутации (УК) этой системы функционирует как СМО с комбинированной дисциплиной обслуживания – с ожиданием и с потерями. На рисунке 1 представлена модель тракта обмена информацией в сети NGN . Функции распределения интервалов между моментами поступления заявок (ими являются IP -пакеты) обозначены как $A_i(t)$. Обозначения $B_i(t)$ использованы для функций распределения времени обслуживания заявок.

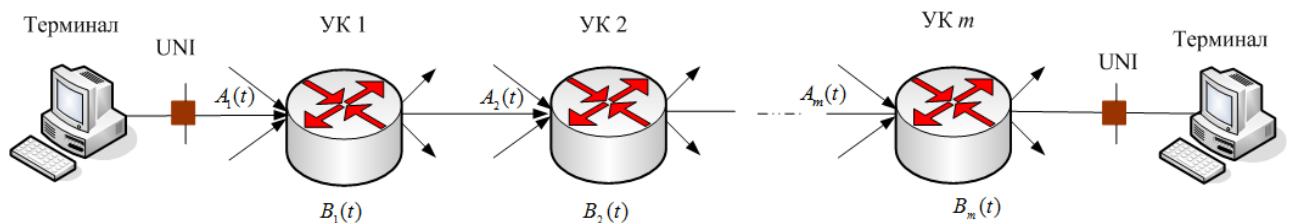


Рисунок 1 – Модель тракта обмена информацией в сети NGN

Математическая модель рассматриваемого тракта 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.

Наибольшее влияние на качество предоставления услуг связи в современных сетях имеют вероятностно-временные характеристики, отражающие процесс обмена пакетами между интерфейсами *UNI* или на участке маршрута. Эти характеристики выражаются через параметры *IPTD*, *IPLR* и *IPDV*.

Для описания процессов обслуживания трафика в сетях связи часто используются аналитические модели *M/M/1*, *M/D/1* и *M/G/1*. Свойства реальных потоков в сети связи могут существенно отличаться от свойств простейшего потока. Это приводит к тому, что оценки, полученные с использованием аналитических выражений, будут отличаться от реальных значений исследуемых параметров. Оценить эту ошибку можно использованием имитационного моделирования. С этой точки зрения модель на основе системы массового обслуживания *G/G/1* представляется универсальной.

При описании маршрута последовательностью независимых СМО средняя задержка доставки пакета на участке *UNI-UNI* будет определяться как сумма средних задержек на каждой из фаз обслуживания. Рассмотрим *m*-фазную СМО, для которой процесс на фазе *i* влияет на задержку заявок на фазе *i+1*. В этом случае для величин времени задержки заявок – S_i и S_{i+1} справедлива некая зависимость $S_{i+1} = F(S_i)$, которой предлагается пренебречь. Иными словами каждая СМО анализируется как автономно функционирующая система. В этом случае величина *IPTD* оценивается суммой всех значений вида S_i для $i = \overline{1, m}$:

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

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

Соотношение (1), с учетом существования функций вида $S_{i+1} = F(S_i)$, рассматривается как приближенная формула. Корректность допущения $S_{i+1} \neq F(S_i)$ проверяется методом имитационного моделирования. Результаты оценки ошибок в расчете показателя *IPTD* приведены ниже.

Вероятность потерь *IP*-пакетов в узлах коммутации сети определяется интенсивностью трафика, числом мест для ожидания, политикой обслуживания очередей и методами предотвращения перегрузки. Для расчета вероятности потерь в *i*-ой системе вида *G/G/1 – IPLR_i* существуют хорошие приближения. Для многофазной СМО, при независимости процессов на каждой из фаз обслуживания, искомая вероятность оценивается следующим образом:

$$IPLR \approx 1 - \prod_{i=1}^m (1 - IPLR_i). \quad (2)$$

Выражение (2) также рассматривается как приближенная формула, так как не учитывается зависимость между отдельными компонентами маршрута прохождения заявок.

Для оценки ошибок в расчетах *IPTD* и *IPLR*, обусловленных принятыми допущениями, выполнено имитационное моделирование. При этом длительность обслуживания заявок (*IP*-пакетов) полагалась постоянной, что соответствует реальным условиям работы УК в сетях *NGN*, а характер входящих потоков заявок и их количество менялись. Менялось также и количество фаз обслуживания.

В программном пакете *Anylogic* была разработана имитационная модель, состоящая из нескольких УК, через которые проходит поток пакетов. Число этих источников нагрузки в экспериментах выбиралось разным. Характер входящего потока задается распределением интервалов времени между моментами поступления пакетов. В качестве закона распределения был выбран ряд функций вида $A_i(t)$. Ниже, на рисунке 2, иллюстрируется зависимость относительной ошибки в расчете *IPTD* от количества входящих потоков с распределением Вейбулла-Гнеденко. Поведение исследуемой ошибки может быть представлено степенной функцией.

Из графиков видно, что при росте количества входящих потоков, относительная ошибка в расчете *IPTD* снижается. При шести и более потоках, что характерно для реальных сетей, ошибка не превышает 10%, что приемлемо для инженерных расчетов при планировании и эксплуатации *NGN*. Для значения $\rho = 0,9$ пунктирной линией показаны верхняя и нижняя границы

(двухсторонний доверительный интервал) для уровня значимости, равного 0,05. Для *IPLR* получены аналогичные соотношения для ошибки.

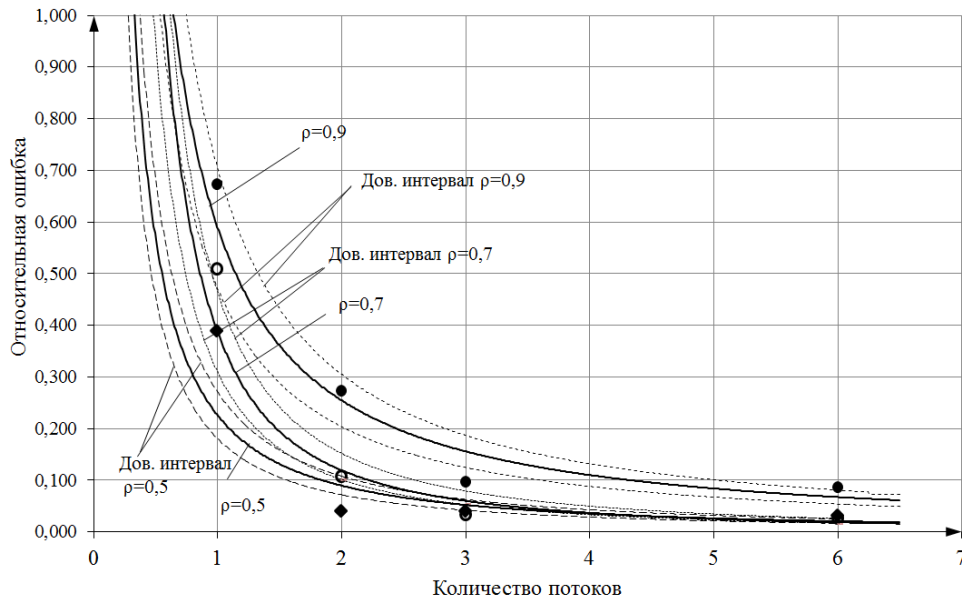


Рисунок 2 – Зависимость относительной ошибки в расчете *IPTD* от количества входящих потоков при разных значениях нагрузки ρ

Она не превышает 5% при условии, что на входе каждой системы суммируется шесть и более потоков заявок, что объясняется базовыми положениями теории телетрафика. Это означает, что *NGN* со структурой, типичной для сети связи общего пользования, применение соотношений (1) и (2) правомерно.

Третья глава посвящена разработке метода декомпозиции показателя *IPDV*. Расчет этого показателя основан на оценке квантиля функции распределения времени задержки *IP*-пакетов, что усложняет вычислительные процедуры. При помощи простых моделей телетрафика было проведено исследование изменения квантиля t_p (значение $p=0,999$ задано в рекомендации *ITU-T Y.1541*) при разных значениях нагрузки фаз обслуживания ρ и их количества m . Зависимости $t_p(m, \rho)$ приведены на рисунке 3.

Построенные графики демонстрируют характер, близкий к линейному закону. Это позволяет записать формулу для расчета квантиля функцией, зависящей от m и ρ :

$$t_p(m, \rho) = a(m, \rho) \cdot m + b(m, \rho). \quad (3)$$

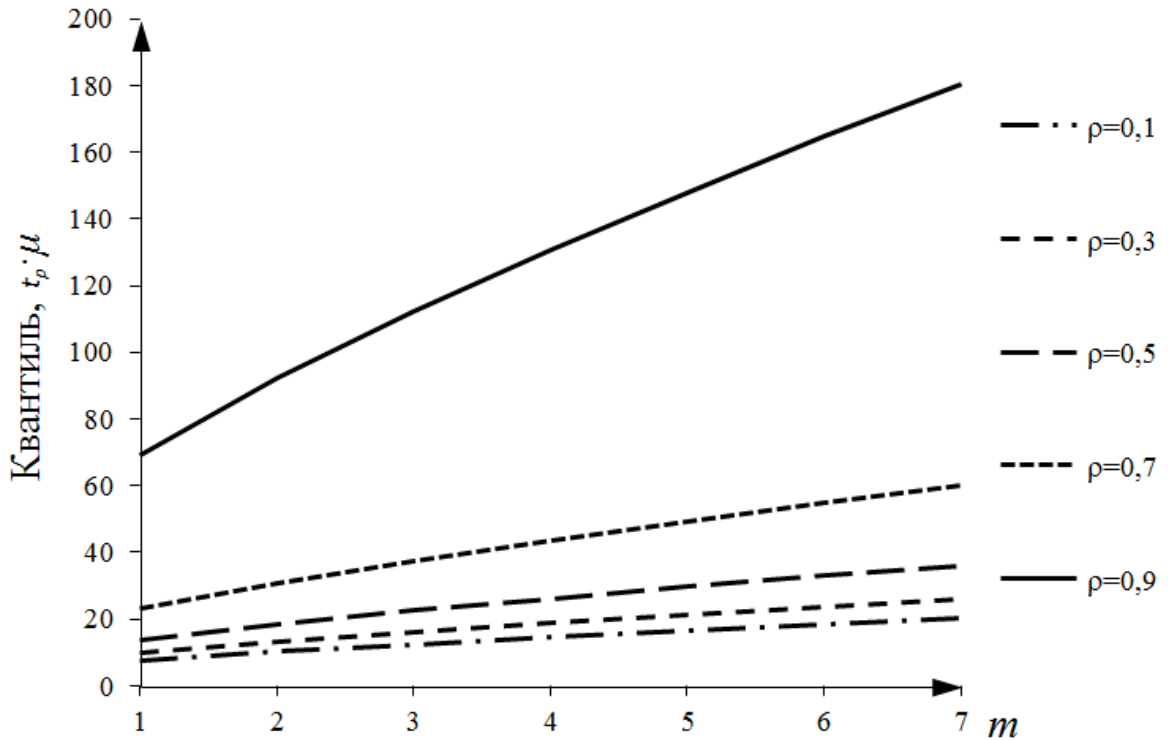


Рисунок 3 – Зависимость квантиля t_p от нагрузки ρ и количества фаз m

Коэффициенты $a(m, \rho)$ и $b(m, \rho)$ вычисляются методом наименьших квадратов. Аппроксимация зависимости квантиля от числа фаз обслуживания позволила получить следующее приближение:

$$t_p(m, \rho) \approx \frac{1,838 \cdot m + 5,468}{1 - \rho}. \quad (4)$$

При $0,1 \leq \rho \leq 0,9$ и $2 \leq m \leq 7$ относительная ошибка в расчете квантиля по приближенной формуле не превышает 6%, что приемлемо для большей части практических задач. Это означает, что показатель $IPDV$ может быть распределен по отдельным фазам обслуживания, используя линейный закон.

Функция времени задержки заявок $S(t)$ может быть получена при помощи ряда Эджворта. Он позволяет представить исследуемую функцию через нормальное распределение $\Phi(t)$ и его производные $\Phi^{(k)}(t)$:

$$S(t) = \Phi(t) + \sum_{k=3}^{\infty} (-1)^k \frac{h_k}{k!} \Phi^{(k)}(t), \quad (5)$$

где h_k – квазимоменты распределения k -го порядка, определяемые через кумулянты k_i . Обычно используются не более четырех членов суммы по k . Близость распределения $S(t)$ и его аппроксимации рядом Эджворта удобно исследовать при описании функций $A_i(t)$ и $B_i(t)$ экспоненциальным законом. Функция распределения времени задержки и ее приближение, полученное с помощью ряда Эджворта $\hat{S}(t)$, приведены на рисунке 4.

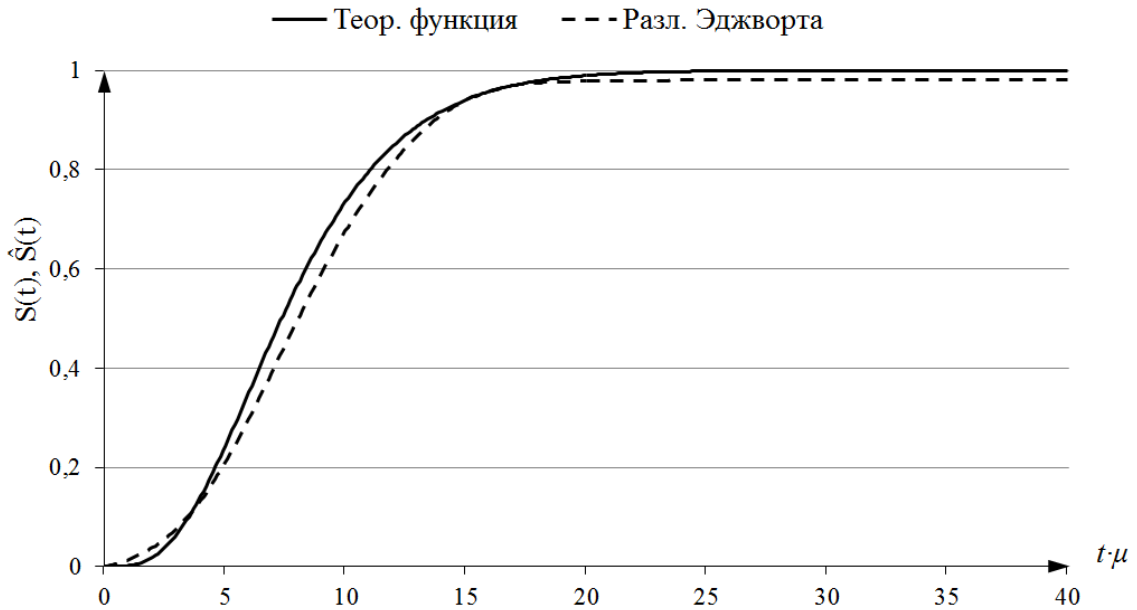


Рисунок 4 – Функция распределения времени задержки и ее приближение, полученное при помощи ряда Эджворта

Для проверки полученных закономерностей при потоках, отличных от пуассоновского, было использовано имитационное моделирование. Рассматриваемая модель состоит из m узлов коммутации. Характер входящего потока, для приведенных ниже графиков, определяется распределением Вейбулла-Гнеденко с нагрузкой от 0,5 до 0,9 для разных коэффициентов вариации: 2, 5 и 10. На входы остальных узлов поступают заявки с выходов предшествующих узлов с вероятностью, обратно пропорциональной количеству возможных маршрутов. При этом суммарная нагрузка на узел равна 0,5 Эрл.

Использование распределений, отличных от закона Вейбулла-Гнеденко, но с теми же значениями коэффициентов вариации показали справедливость полученных выводов. Это означает, что результаты моделирования инвари-

антны к виду входящего потока заявок при идентичности их интенсивности и коэффициента вариации.

Результаты моделирования показали, что показатель $IPDV$ может быть аппроксимирован линейной функцией с высокой точностью. На рисунке 5 приведены зависимости $IPDV$ для $УК=7$ при разных коэффициентах вариации функции $A_i(t)$ и нагрузки ρ . Для значения $\rho=0,9$ пунктирной линией показаны верхняя и нижняя границы (двухсторонний доверительный интервал) для уровня значимости, равного 0,01.

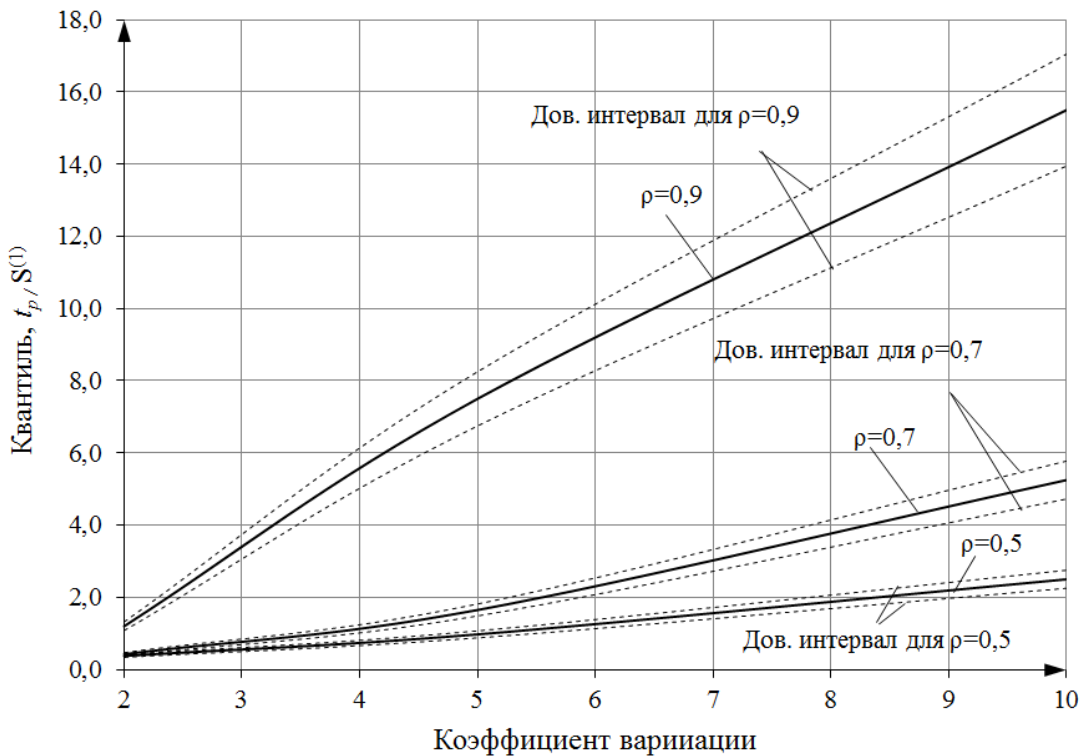


Рисунок 5 – Зависимости вариации задержки IP -пакетов для $УК=7$ при разных значениях нагрузки ρ

Полученные зависимости могут быть аппроксимированы простыми аналитическими выражениями с приемлемой точностью. Они могут быть использованы для практических целей при декомпозиции показателя $IPDV$.

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 рекомендации по декомпозиции показателей $IPTD$, $IPLR$ и $IPDV$.

Задача для тракта 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 обозначим 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 основу для переговорного процесса. Это означает, что решение задачи не следует рассматривать как поиск оптимума.

Необходимо найти связь между затратами операторов связи (C_A , C_B и C_C) и ресурсами их сетей. Ресурсы определяются производительностью узлов коммутации – G_A , G_B и G_C . Зависимость затрат оператора связи от производительности, может быть выражена на основании зависимости, полученной за счет обработки статистической информации по затратам на приобретение телекоммуникационного оборудования. Используя коэффициент пропорциональности ξ , получаем:

$$C \approx \xi \left(\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C} \right). \quad (6)$$

Для технологии "коммутация каналов" ранее было получено значение $k = 3$. Операторы, зная свои затраты на создание сети, могут с высокой точностью рассчитать величину k для технологии "коммутация пакетов". Обычно предполагается, что доля дохода оператора связи должна быть пропорциональна его затратам. Тогда искомые величины r_A , r_B и r_C рассчитываются так:

$$r_A \approx \frac{\sqrt[k]{G_A}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}, r_B \approx \frac{\sqrt[k]{G_B}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}, r_C \approx \frac{\sqrt[k]{G_C}}{\sqrt[k]{G_A} + \sqrt[k]{G_B} + \sqrt[k]{G_C}}. \quad (7)$$

Предлагаемый метод распределения доходов между операторами связи учитывает реальные затраты каждого участника телекоммуникационного рынка, необходимые для обеспечения нормированных показателей *QoS*.

В **Заключении** приведены основные выводы и результаты по диссертационной работе. В **Приложениях** к диссертации приведены результаты расчетов, не вошедшие в основной текст, и акты об использовании результатов диссертации.

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 фор-

ме. 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 рассматривать 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.

Основные публикации по теме диссертации.

Публикации в изданиях, рекомендованных

ВАК при Минобрнауки России

1. Мохаммед А.А.С. Метод оценки вариации задержки в пакетных сетях // Электросвязь. – 2014. – № 10. – С. 48–49.
2. Мохаммед А.А.С., Соколов Н.А. Методы декомпозиции показателей QoS для NGN // Вестник связи. – 2014. – №6. – С. 44–45.

3. *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.
4. *Mohammed A.A.S.* Investigation of decomposition of quality indexes standardized for the Next Generation Network // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 8. – С.106–107.

Другие статьи и материалы конференции

1. *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.
2. *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.
3. *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 апреля 2014. – С.172–173.
4. *Мохаммед А.А.С.* Два основных варианта декомпозиции показателей качества обслуживания в сети NGN // II-ая Международная научно-техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании": сборник научных статей, СПб. 26–27 февраля 2013. – С.164–167.
5. *Мохаммед А.А.С.* Распределение доходов операторов мультисервисных услуг: Учет QoS // Первая миля. – 2015. – № 1. – С. 48–50.