

На правах рукописи

СОКОЛОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЗАДЕРЖЕК IP-ПАКЕТОВ
В СЕТИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на кафедре "Сети связи"

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Яновский Геннадий Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Самуйлов Константин Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент
Юркин Юрий Викторович

Ведущая организация: **ЛО ЦНИИС**

Защита состоится " ____ " _____ 2011 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 219.004.02 при Санкт-Петербургском Государственном Университете Телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 61, ауд. 205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзыв об автореферате в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного Совета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Харитонов В.Х.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из важнейших направлений развития сетей электросвязи стал переход к пакетным технологиям передачи и коммутации. Эти технологии используются для обслуживания трафика речи, данных и видео. В результате сформировалась возможность перехода к единой сети, которая поддерживает множество инфокоммуникационных услуг. Она получила название "Сеть следующего поколения", а среди специалистов более известна по аббревиатуре NGN – Next Generation Network.

Переход к сети следующего поколения имеет ряд неоспоримых достоинств: повышение доходов за счет расширения спектра предоставляемых услуг, снижение эксплуатационных расходов Оператора связи и другие. Один из существенных недостатков концепции NGN – появление новых проблем с поддержкой нормированных показателей качества обслуживания трафика. Основная причина подобных проблем заключается в дополнительной задержке передачи информации, которая обусловлена природой пакетных технологий.

В рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ) показатели качества обслуживания трафика в пакетных сетях нормируются несколькими параметрами. Основные задачи проектирования сети (например, выбор пропускной способности транспортных ресурсов и производительности узлов коммутации – маршрутизаторов) связаны с обеспечением двух вероятностно-временных показателей, определяемых между интерфейсами пользователь-сеть (ИПС):

- математического ожидания времени задержки IP-пакетов;
- вариации времени задержки IP-пакетов;

В документах МСЭ эти показатели обозначаются как *IPTD* (IP packet transfer delay) и *IPDV* (IP Packet Delay Variation) соответственно.

Решение ряда задач при проектировании пакетных сетей, включая NGN, основано на расчетах вероятностно-временных характеристик систем массового обслуживания (СМО). Заявками (требованиями), поступающими на вход СМО, служат IP-пакеты, которые должны быть переданы через транспортную сеть и обработаны в маршрутизаторах сети NGN. Публикации, посвященные трафику в пакетных сетях, свидетельствуют, что входящий поток заявок существенно отличается от пуассоновского, который адекватно описывает процесс поступления вызовов в сетях телефонной связи.

Исследование моделей СМО с произвольным характером входящего потока заявок активизировалось в последние годы благодаря изучению трафика Интернет. Существенный вклад в развитие разделов теории телетрафика, которые относятся к СМО с произвольным характером входящего потока заявок, внесли российские (Г.П. Башарин, А.Е. Кучерявый, В.И. Нейман, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, Г.Г. Яновский) и зарубежные (Д. Кениг, Л. Клейнрок, П. Кюн, Д. Штойян) исследователи. Тем не менее, остается ряд вопросов, касающихся оценки показателей вида *IPTD* и *IPDV*, которые требуют дополнительного исследования. К ним, в частности, относятся следующие задачи:

- получение выражений, позволяющих рассчитать моменты времени задержки IP-пакетов (для вычисления величин *IPTD* и ряда других показателей),
- оценка квантилей распределения времени задержки IP-пакетов (для расчета величины *IPDV*),
- анализ влияния приоритетных дисциплин обслуживания, вводимых для IP-пакетов некоторых видов.

Данные обстоятельства позволяют считать исследование параметров задержки IP-пакетов, как важнейших характеристик качества обслуживания трафика в NGN, актуальной научной задачей.

Цель работы и задачи исследования. Цель диссертации состоит в разработке методов расчета вероятностно-временных характеристик качества обслуживания трафика в пакетной сети класса NGN, непосредственно связанных с параметрами задержки IP-пакетов. Поставленная цель достигается за счет решения следующих основных задач:

1. выбор математических моделей сети NGN и ее компонентов в виде СМО, адекватно отражающих процессы обмена IP-пакетами между интерфейсами пользователь-сеть;
2. разработка метода расчета задержек IP-пакетов и исследование вероятностно-временных характеристик качества обслуживания трафика в узле NGN;
3. разработка метода расчета задержек IP-пакетов и исследование вероятностно-временных характеристик качества обслуживания трафика между интерфейсами пользователь-сеть сети NGN;
4. проведение имитационного моделирования для проверки корректности ряда допущений, которые были сделаны для получения аналитических выражений;
5. разработка рекомендаций для планирования сети NGN в части поддержки нормированных показателей качества обслуживания трафика.

Методы исследования. При проведении исследований применялись методы теории вероятностей, теории телетрафика, интегральных преобразований и имитационного моделирования.

Научная новизна. В диссертационной работе предложена и обоснована модель процессов передачи IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть, получены новые результаты в виде аналитических выражений для вычисления вероятностно-временных характеристик функционирования сети NGN, на основании которых сформулированы рекомендации для проектирования сети и контроля установленных показателей качества обслуживания трафика.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Полученные при проведении исследований результаты представляют собой раздел методики проектирования сети NGN, который связан с расчетами пропускной способности транспортных ресурсов и производительности маршрутизаторов в соответствии с заранее заданными качественными показателями. Результаты диссертационной работы были

использованы при составлении методики проектирования сети NGN в институте "Гипросвязь СПб" и в разработке принципов контроля показателей качества обслуживания трафика в ЛО ЦНИИС. На основании полученных результатов от имени Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации были представлены два вклада в 12-ю исследовательскую комиссию МСЭ.

Внедрение результатов диссертации подтверждается соответствующими актами. Результаты работы могут быть использованы также исследовательскими центрами, учебными заведениями, производителями оборудования электросвязи и эксплуатационными компаниями по тематике "Сети следующего поколения".

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на трех международных конференциях (ITU-D Regional Development Forum for the EUR and CIS Region "NGN and Broadband, Opportunities and Challenges", 2009, IEEE Eurocon, 2009, Fifth FRUCT seminar, 2009), Всероссийской конференции с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем" (Москва, 2011), а также на 60-й, 62-й и 63-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГУТ (2008, 2010 и 2011 годы соответственно).

Публикации. Материалы, отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках научно-технических конференций и в журналах отрасли. Всего опубликовано 12 работ; из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает содержание, список сокращений, введение, четыре главы, заключение, библиографический список и одно приложение. Работа содержит 136 страниц текста, включая приложение, 31 рисунок и библиографический список из 97 наименований.

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

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели сети NGN и ее основных компонентов для исследования задержки IP-пакетов.
2. Методы оценки параметров задержки IP-пакетов для сети NGN, в узлы которой поступает трафик с произвольным законом распределения времени интервалов между соседними заявками.
3. Результаты анализа параметров задержки IP-пакетов в сети NGN и в ее отдельных узлах.
4. Метод оценки вероятностно-временных характеристик при введении приоритетного обслуживания IP-пакетов.
5. Результаты имитационного моделирования вероятностно-временных характеристик качества обслуживания трафика в сети NGN.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, проанализировано состояние исследуемого вопроса, сформулирована цель работы, перечислены основные научные

результаты диссертации, ее краткое содержание и приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе формулируются задачи, которые связаны с анализом характеристик качества обслуживания в сети NGN. Одна из особенностей этой сети состоит в том, что качество обслуживания трафика зависит от принятой Оператором стратегии развития телекоммуникационной системы. По этой причине сначала выполнен анализ возможных принципов перехода к сети NGN. Выбран типовой вариант миграции телефонной сети общего пользования к NGN, который учитывает требования по обеспечению заданных показателей качества обслуживания.

Затем сформулированы ключевые особенности сети NGN с точки зрения обеспечения показателей, определяющих качество обслуживания. Данные особенности порождаются затратами времени: на формирование IP-пакета, пребывание в маршрутизаторах, распространение сигналов, которое в российских условиях может быть весьма существенным, сериализацию и буфер джиттера. На рис. 1 слагаемые задержки IP-пакетов указаны для эталонной модели тракта передачи информации в сети NGN. Величины X , Y и t_i ($i = \overline{1, N+1}$) могут считаться постоянными, то есть имеющими нулевую дисперсию. Такое предположение не приемлемо для величин T_i ($i = \overline{1, N}$). Для выбранной модели предполагается, что функции формирования IP-пакетов выполняются в терминальном оборудовании.

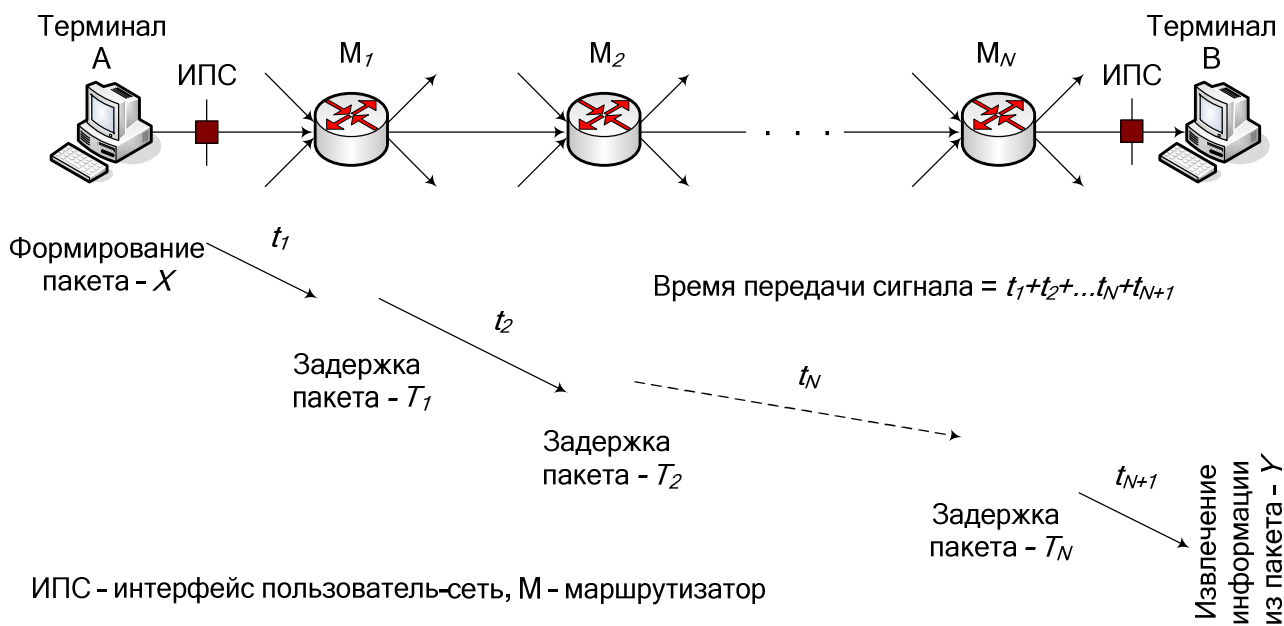


Рис. 1. Эталонная модель тракта передачи информации в сети NGN

В рекомендациях МСЭ приводится ряд показателей качества обслуживания трафика в NGN. Из них к вероятностно-временным показателям относятся: среднее значение времени задержки IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть – $IPTD$ и вариация этой же случайной величины – $IPDV$. Для расчета значения $IPDV$ необходимо знать две величины:

- p -квантиль функции распределения времени задержки IP-пакетов между ИПС t_p (он нормирован МСЭ при условии, что $p = 0,999$);
- минимально возможное время обмена IP-пакетами между ИПС t_{min} .

Значение $IPDV$ определяется как разность $t_p - t_{min}$. Вычисление величины t_{min} связано с анализом постоянных составляющих, определяемых структурой сети между ИПС и характеристиками используемого терминального оборудования. Оценка значения t_p представляет собой сложную задачу. Расчет величины $IPVD$ также становится непростой задачей, когда IP-пакеты формируют поток заявок, отличающийся от пуассоновского.

В результате анализа процессов обмена пакетами были поставлены две задачи по оценке вероятностно-временных характеристик IP-сети. Во-первых, необходимо разработать метод расчета математического ожидания времени задержки IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть. Во-вторых, следует предложить метод оценки p -квантиля функции распределения времени задержки IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть. Для решения этих задач был проведен обзор публикаций по исследованию задержек в пакетных сетях. В результате были сформулированы новые задачи, которые необходимо решить.

Во второй главе исследуются характеристики качества обслуживания трафика в маршрутизаторе. Для этого была разработана модель маршрутизатора. Ряд публикаций, посвященных параметрам трафика в сети NGN, свидетельствует, что совокупность IP-пакетов, которые должны быть обработаны в маршрутизаторе, заметно отличается от пуассоновского потока заявок. Обычно первичные сведения о входящем потоке заявок представляют собой гистограмму, получаемую в результате измерений. Если усреднение результатов измерений производится по оси абсцисс с наибольшим общим делителем τ , то преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения длительности интервалов между поступающими заявками $\alpha(s)$ определяется следующим образом:

$$\alpha(s) = e^{-z\tau s} \sum_{i=0}^m p_i e^{-i\tau s}, \quad (1)$$

где $z\tau$ – сдвиг приращения p_0 относительно точки $t = 0$; p_i – величина приращения рассматриваемой функции распределения в точке $i\tau$, m – номер последнего приращения функции $A(t)$, являющейся оригиналом от изображения $\alpha(s)$.

Далее чаще всего выбирается аппроксимация функции $A(t)$ в виде одного из известных распределений непрерывных случайных величин методом наименьших квадратов. При этом возникает ошибка, которая может существенно влиять на точность дальнейших вычислений. Для исключения этой ошибки в диссертационной работе используется модель в виде СМО с входящим потоком заявок, который представим при помощи распределения (1).

Математическая модель маршрутизатора может быть представлена в классификации Кендалла при помощи обозначения такого вида: $G_s / D / 1 / \infty / f_j^0$. Указанные символы подчеркивают следующие свойства модели:

- G_s – поток заявок является произвольным, а функция распределения длительности интервалов между поступающими заявками имеет ступенчатый характер;
- D – время обработки IP-пакетов определяется совокупностью стандартных операций и его можно считать постоянным;
- 1 – маршрутизатор рассматривается как один обслуживающий прибор;
- ∞ – количество мест для ожидания в очереди не ограничено (для допустимой вероятности потери IP-пакетов, которая нормируется МСЭ на уровне 10^{-3} , такое предположение приемлемо);
- f_j^0 – постановка в очередь осуществляется без преимуществ, а для обслуживания могут использоваться дисциплины "первым пришел – первым обслужен" ($j = 0$) или с относительными приоритетами ($j = 1$).

Среднее значение времени задержки IP-пакетов в маршрутизаторе $T^{(1)}$ определяется суммой средних значений двух отрезков времени: ожидания в очереди $W^{(1)}$ и обслуживания $B^{(1)}$. Для каждого типа маршрутизатора время обслуживания известно. Величину $W^{(1)}$ можно определить из формулы для кумулянтов $n - go$ порядка времени ожидания начала обслуживания W_n^C :

$$W_n^C = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \int_0^{\infty} x^n dF^{(k)}(x), \tag{2}$$

где функция $F(x)$ определяется преобразованием Лапласа-Стилтьеса $\varphi(s)$ такого вида:

$$\varphi(s) = \alpha(-s)\beta(s). \tag{3}$$

$\beta(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения времени обслуживания $B(t)$. Величину $B^{(1)}$ целесообразно представить в виде произведения $l\tau$. Тогда для исследуемой модели функция $\varphi(s)$ определяется таким выражением:

$$\varphi(s) = e^{(z-l)\tau s} \sum_{i=0}^m p_i e^{i\tau s}. \tag{4}$$

В формулу (2) входит k – кратная свертка функции $F(x)$. Для преобразования Лапласа-Стилтьеса она вычисляется возведением правой части выражения (4) в степень k :

$$[\varphi(s)]^k = e^{k(z-l)\tau s} \sum_{i=0}^{km} q_i(k) e^{i\tau s}. \tag{5}$$

Коэффициенты $q_i(k)$ определяются на основании правила возведения ряда в степень:

$$q_i(k) = \begin{cases} p_0^k, & \text{если } i = 0 \\ \frac{1}{ip_0} \sum_{j=1}^i (jk - i + j) \cdot p_j \cdot q_{i-j}(k), & \text{если } i = \overline{1, mk} \end{cases} \quad (6)$$

После ряда преобразований выражение для расчета кумулянтов было получено в такой редакции:

$$W_n^C = \tau^n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{km} q_i(k) [i + k(z - l)]^n \delta[i + k(z - l)], \quad (7)$$

где функция $\delta(x)$ равна единице при нулевом или отрицательном значении x , и нулю – в противоположном случае.

Кумулянты W_1^C и W_2^C определяют среднее значение и дисперсию времени ожидания заявок в очереди для моделей вида $G_S / D / 1 / \infty / f_0^0$. Среднее значение времени задержки заявок $T^{(1)}$ и дисперсия этой величины σ_S^2 рассчитываются по следующим формулам:

$$T^{(1)} = W_1^C + B^{(1)}, \quad \sigma_S^2 = W_2^C. \quad (8)$$

Для вычисления значений $T^{(1)}$ и σ_S^2 с использованием формулы (7) необходимо выбрать верхний предел суммирования по k , то есть заменить символ " ∞ " неким конечным значением M . Оно определяется и видом функции $A(t)$, и значением нагрузки СМО ρ , которая равна отношению интенсивности входящего потока заявок λ к интенсивности обслуживания μ . Численный анализ показывает, что при $0 < \rho < 0,7$ достаточно установить верхний предел суммирования $M = 10m$. Тогда, даже для самых сложных видов функции $A(t)$, ошибки в расчете первых трех кумулянтов не превысят одного процента.

Для оценки квантиля используется метод, предложенный в рекомендации МСЭ Y.1541:

$$t_p \approx T^{(1)} + \sigma_S \left\{ x_p - \frac{\gamma [1 - (x_p)^2]}{6} \right\}. \quad (9)$$

Величина x_p определяется как p -квантиль для стандартного нормального распределения, а γ – коэффициент асимметрии времени задержки IP-пакетов. Для расчета величины γ необходимо вычислить кумулянт W_3^C . Далее необходимо оценить точность соотношения (9), о которой в рекомендации Y.1541 не говорится. С этой целью были получены точные значения p -квантилей для нескольких видов функции распределения времени задержки заявок в СМО. В результате была установлена следующая закономерность. Для распределений, которые заданы на интервале времени

$[0, \infty)$ метод МСЭ позволяет оценить квантиль при $p = 0,999$ (норма, установленная рекомендацией Y.1541) с погрешностью не более 10% для практически важных диапазонов изменений параметров трафика. Для задержки, заданной на конечном интервале, предлагается оценивать квантиль, используя обобщенное бета-распределение. По результатам исследований ошибок, возникающих при использовании метода, который предложен в рекомендации Y.1541, был представлен вклад в 12-ю исследовательскую комиссию МСЭ (размещен на сайте МСЭ 13 октября 2009 года как вклад №61, представленный Администрацией связи Российской Федерации).

На рис. 2 для модели $G_S / D / 1 / \infty / f_0^0$ сплошными линиями показаны изменения среднего значения времени задержки IP-пакетов $T^{(1)}$ и p -квантиля (при условии, что $p = 0,999$) в зависимости от нагрузки маршрутизатора ρ . Для построения кривых была выбрана модель входящего потока IP-пакетов с коэффициентом вариации, равным единице. Предполагалось, что функция $A(t)$ имеет такие приращения: 0,4 в точке 0τ , 0,3 в точке 2τ , 0,2 в точке 4τ и 0,1 в точке 6τ .

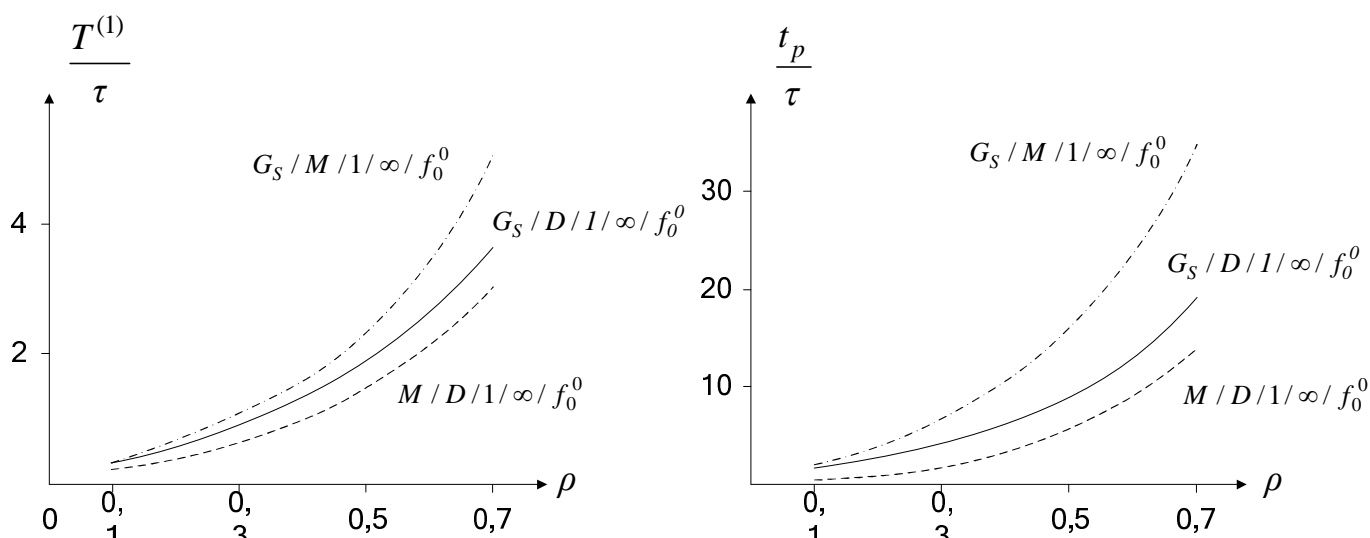


Рис. 2. Зависимости величин $T^{(1)}$ и t_p от нагрузки ρ

Пунктирными линиями показаны аналогичные функции, полученные для пуассоновского потока IP-пакетов. Для обоих потоков IP-пакетов коэффициенты вариации совпадают. Тем не менее, исследуемые характеристики ведут себя по-разному. Следовательно, совпадение первых двух моментов для разных распределений $A(t)$ не позволяет получить идентичные оценки для средней величины времени задержки заявок и p -квантиля.

Штрихпунктирными линиями изображены зависимости, справедливые для модели $G_S / M / 1 / \infty / f_0^0$. Соотношения для расчета среднего значения времени задержки заявок и функции распределения этой случайной величины для этой модели известны, так как для ступенчатой функции $A(t)$ всегда существует преобразование Лапласа-Стилтьеса. Модель $G_S / M / 1 / \infty / f_0^0$ позволяет получить верхние границы исследуемых параметров времени задержки IP-пакетов. Они интересны для тех видов

маршрутизаторов, в которых время обработки IP-пакетов нельзя считать постоянной величиной. Различие верхних и нижних границ для величин $T^{(1)}$ и t_p не столь существенно при условии, что $\rho \leq 0,5$. По мере повышения нагрузки ошибка в расчете $T^{(1)}$ и t_p резко возрастает.

Для получения исследуемых характеристик качества обслуживания трафика в сети NGN при использовании приоритетной дисциплины обслуживания целесообразно ввести три оценки: оптимистическую (*opt*), пессимистическую (*pes*) и прагматическую (*pra*). Для получения оптимистической и пессимистической оценок $T^{(1)}$ и t_p рассматриваются два случая поступления IP-пакета первого приоритета в маршрутизатор. В первом случае он застает маршрутизатор в тот момент времени, когда не обрабатывается IP-пакет более низкого приоритета. Во втором случае предполагается, что обработка IP-пакета более низкого приоритета только началась. Для получения прагматической оценки предполагается, что время обработки IP-пакета более низкого приоритета распределено равномерно на отрезке времени $[0, lt]$. На рис. 3 показаны три оценки для функции распределения времени задержки для IP-пакетов первого относительного приоритета. Ее p -квантиль определяется в той точке на оси времени, для которой значение исследуемой функции равно p .

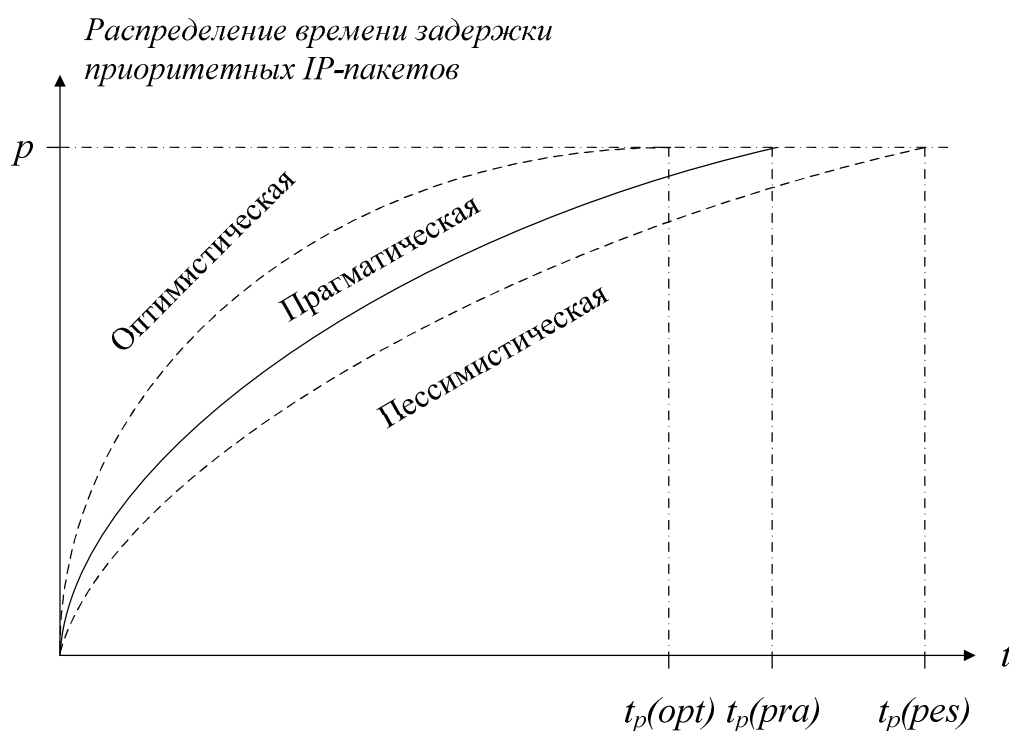


Рис. 3. Оценки p -квантиля распределения времени задержки

Очевидно, что справедливо следующее неравенство: $t_p(opt) \leq t_p(pra) \leq t_p(pes)$. В диссертационной работе предложен метод нахождения величины $t_p(pra)$, который основан на подходе, рекомендованном МСЭ. Результаты вычислений оценки $t_p(pra)$

для простых моделей СМО и моделирования для более сложных систем показали, что оценки $T^{(1)}(pra)$ и $t_p(pra)$ можно улучшить, умножая их на величину η , зависящую от суммарной нагрузки маршрутизатора ρ :

$$\eta = \frac{1 + \sqrt{\rho}}{2}. \quad (10)$$

Выражение (10) было получено в диссертационной работе за счет сравнения результатов вычислений прагматической оценки в области разных значений нагрузки маршрутизатора. При $0,25 < \rho < 0,75$ величина относительной ошибки в оценке нормируемых показателей качества обслуживания для IP-пакетов первого относительно приоритета не превышает 10%.

По результатам исследования дисциплины приоритетного обслуживания для некоторых IP-пакетов в маршрутизаторах сети NGN подготовлен вклад Администрации связи Российской Федерации для представления в 12-ю Исследовательскую комиссию МСЭ. Текст этого вклада (на английском языке, как требует МСЭ) приведен в приложении к диссертационной работе.

В третьей главе исследуются характеристики качества обслуживания трафика между ИПС. Математической моделью служит многофазная СМО. С учетом нормируемых показателей качества обслуживания трафика в сети NGN следует выделить маршрут "максимальной длины", по которому IP-пакеты будут передаваться между ИПС. Пример такого маршрута был показан на рис. 1.

Многофазная СМО образуется совокупностью моделей вида $G_s / D / 1 / \infty / f_j^0$. Постоянные значения X , Y и t_i ($i = \overline{1, N+1}$) целесообразно учитывать введением в состав маршрута еще одной СМО вида $G / D / \infty / \infty / f_0^0$, для которой время обслуживания IP-пакетов θ определяется очевидной суммой: $\theta = X + Y + \sum_{i=1}^{N+1} t_i$.

Если в тракте обмена информацией между ИПС каждый IP-пакет претерпевает дополнительную постоянную задержку t_0 (например, в межсетевом шлюзе), то ее можно учесть, поменяв нижний индекс в сумме по i с единицы на ноль. Соотношения, полученные во второй главе, позволяют рассчитать среднее значение времени задержки IP-пакетов в каждом i -ом маршрутизаторе $T_i^{(1)}$. Тогда величина $IPTD$ в силу свойства аддитивности математического ожидания суммы взаимно независимых случайных величин определяется следующим соотношением:

$$IPTD = \theta + \sum_{i=1}^{N+1} T_i^{(1)}. \quad (11)$$

Для расчета $IPDV$ используется методика, предложенная МСЭ – формула (9). Величина t_{min} , входящая в выражение для вычисления $IPDV$, может оцениваться по такой формуле:

$$t_{min} = \theta + \sum_{i=1}^N B_i^{(1)}, \quad (12)$$

где $B_i^{(1)}$ – минимальное время обработки IP-пакетов в i -ом маршрутизаторе.

Основная сложность оценки $IPDV$ обусловлена достоверностью вычисления p -квантиля. В диссертационной работе исследована точность расчетов p -квантиля, выполненных по методу, предложенному МСЭ в рекомендации Y.1541. Был проведен анализ ошибки, возникающей при использовании метода МСЭ, при изменении количества маршрутизаторов (величины N) между ИПС. С этой целью был получен набор функций распределения времени задержки IP-пакетов в многофазной СМО. По этим функциям численно были найдены точные значения p -квантиля. Он сравнивался с p -квантилем, который определялся по формуле (9) при $p = 0,999$.

При проведении измерений обычно фиксируются минимальное и максимальное значения времени задержки IP-пакетов. Можно предположить, что время задержки IP-пакетов в маршрутизаторе равномерно распределено между измеренными минимальным и максимальным значениями. Для этой гипотезы в явном виде получено аналитическое выражение для функций распределения времени задержки IP-пакетов при наличии N фаз обслуживания (то есть, при организации связи между ИПС через N маршрутизаторов).

В таблице 1 приведены значения относительных ошибок, возникающих при расчете p -квантиля, для равномерного закона распределения времени задержки IP-пакетов в каждом маршрутизаторе. Такое распределение можно рассматривать как наихудший случай с точки зрения ошибки, возникающей при аппроксимации результатов измерений аналитическим выражением. В диссертационной работе исследовано также треугольное распределение времени задержки IP-пакетов. Для него ошибки в расчете p -квантиля становятся меньше, чем приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Ошибки при расчете p -квантиля

Метод расчета квантиля при $p = 0,999$	Количество фаз обслуживания IP-пакетов				
	$N = 3$	$N = 5$	$N = 7$	$N = 9$	$N = 11$
по формуле (9)	5,89%	5,60%	4,76%	4,09%	3,60%
по гамма-распределению	24,8%	14,4%	10,3%	8,3%	6,8%
из ряда Эджворта	2,10%	0,39%	0,14%	0,07%	0,04%

Во второй строке таблицы содержатся величины ошибки для метода расчета квантиля, который рекомендован МСЭ – формула (9). В двух нижних строках таблицы указаны ошибки, которые соответствуют аппроксимациям исследуемой функции при помощи гамма-распределения и ряда Эджворта.

По данным, приведенным в таблице, можно сделать такой вывод: метод, который рекомендуется МСЭ, позволяет рассчитывать 0,999-й квантиль с точностью, в целом приемлемой для инженерных расчетов. Более точным становится метод расче-

та квантиля, основанный на ряде Эджворта. Именно этот метод целесообразно использовать для исследования сети NGN.

Снижение относительной ошибки в расчете p -квантиля связано с характером распределения времени задержки IP-пакетов между ИПС при росте количества задействованных маршрутизаторов. На рис. 4 показаны графики плотности распределения времени задержки IP-пакетов $s(t)$ для четырех значений N (количества маршрутизаторов между ИПС). Предполагается, что в каждом маршрутизаторе исследуемое время задержки IP-пакетов распределено на отрезке $[0, x]$ равномерно.

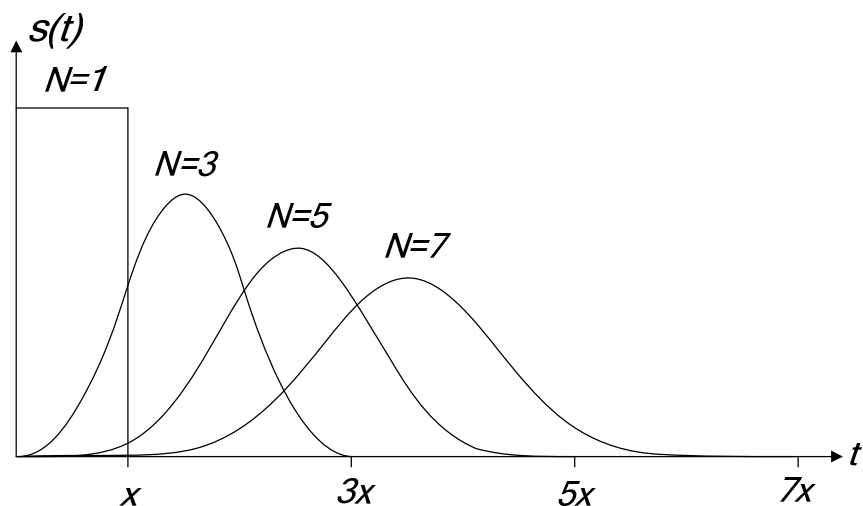


Рис. 4. Плотности распределения времени задержки IP-пакетов

Очевидно, что с ростом N кривые плотности становятся все более похожими на графики, характерные для нормального закона распределения случайных величин. Такая же закономерность наблюдается и для распределений времени задержки IP-пакетов, заданных на интервале $[0, \infty)$. Исследование ошибок, проведенное для распределений времени задержки IP-пакетов в маршрутизаторах, которые заданы в области $[0, \infty)$, показывает, что во всех случаях целесообразно использовать метод МСЭ.

В четвертой главе рассматривается ряд задач по практической реализации полученных результатов. В первую очередь, следует отметить актуальность анализа характеристик качества обслуживания трафика в тех случаях, когда невозможно провести измерения для получения функции $A(t)$, но относительно ее характера можно ввести обоснованную гипотезу. Подобные ситуации типичны для проектируемых сетей и их компонентов. Тогда можно взять отсчеты функции $A(t)$ с неким периодом τ , что позволяет использовать результаты, полученные во второй главе для модели вида $G_s / D / 1 / \infty / f_0^0$. Очевидно, что величина τ должна быть достаточно мала для наилучшей аппроксимации функции $A(t)$. В этом случае можно получить весьма точные оценки для параметров времени задержки IP-пакетов.

Пример дискретизации функции $A(t)$ показан на рис. 5. Для анализируемого распределения изображены две аппроксимации, позволяющие получить верхние и нижние оценки исследуемых характеристик – функции $A_1(t)$ и $A_2(t)$ с приращениями в точках $k\tau$, равных P_k и Q_k соответственно. Смещение этих функций на величину $0,5\tau$ (влево или вправо соответственно) позволяет ввести еще одну аппроксимацию, дающую, как правило, более точные оценки исследуемых характеристик.

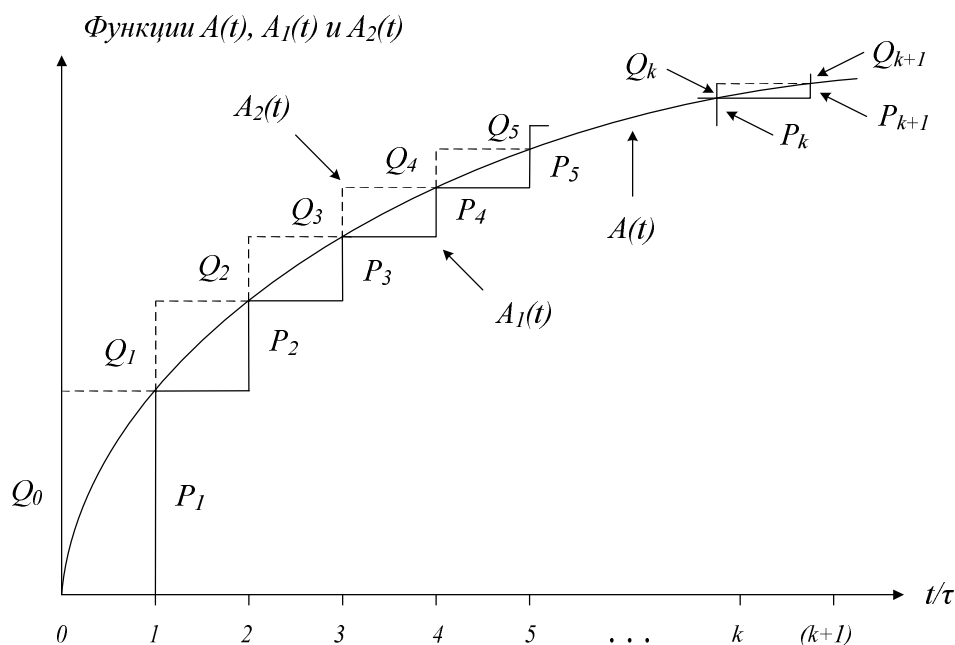


Рис. 5. Ступенчатые функции, аппроксимирующие распределение $A(t)$

Исследования относительной ошибки δ , которая обусловлена дискретизацией функции $A(t)$, позволили сформулировать правило выбора величины τ . В диссертационной работе показано, что для потока IP-пакетов, поступающих в маршрутизатор с интенсивностью λ , необходимо брать отсчеты функции $A(t)$ с периодом, который определяется следующим неравенством:

$$\tau \leq \frac{2\delta}{\lambda}. \quad (13)$$

В сети NGN часто требуется провести анализ характеристик качества обслуживания для моделей с так называемыми "тяжелыми хвостами". Для подобных моделей ошибка δ снижается с ростом коэффициента вариации времени интервалов между моментами поступления заявок в СМО (IP-пакетов в маршрутизаторы). Это позволяет эффективно использовать метод дискретизации для исследования моделей с "тяжелыми хвостами".

При разработке математических моделей маршрутизатора и сети NGN в целом было сделано несколько допущений, корректность которых целесообразно проверить при помощи имитационной модели. В первую очередь, следует проверить гипотезу о

неограниченном количестве мест для ожидания в очереди. В рекомендации МСЭ У.1541 нормируется допустимая вероятность потери IP-пакетов на уровне 10^{-3} .

Процесс имитационного моделирования заключался в генерировании потока заявок с разными функциями $A(t)$. При этом все заявки при длине очереди свыше r терялись. Величина r выбиралась так, чтобы вероятность потери IP-пакетов составляла 10^{-3} . Далее вычислялись исследуемые вероятностно-временные характеристики: $T^{(1)}$ и t_p . Они сравнивались с аналогичными характеристиками, полученными при условии, что количество мест для ожидания в очереди не ограничено.

Моделирование проводилось для следующего диапазона изменения нагрузки: $0,25 < \rho < 0,75$. Результаты моделирования подтвердили справедливость допущения о возможности использования модели с неограниченной длиной очереди. Для этой задачи использовалась имитационная модель в виде СМО

Имитационная модель в виде многофазной СМО была разработана для проверки двух допущений. Во-первых, данная модель позволила получить характеристики качества обслуживания IP-пакетов при использовании приоритетных дисциплин. Во-вторых, при помощи выбранной модели проверялась корректность гипотезы о независимости процессов, протекающих в разных маршрутизаторах сети NGN. Результаты, которые были получены при имитационном моделировании, подтвердили корректность всех допущений, введенных при аналитическом исследовании характеристик качества обслуживания трафика в сети NGN.

На рис. 6 показаны кривые, иллюстрирующие изменение среднего времени задержки приоритетных IP-пакетов $T^{(1)}$, нормированного относительно длительности их обслуживания $B^{(1)}$, в зависимости от суммарной нагрузки ρ . При выполнении вычислений и моделирования предполагалось, что нагрузка приоритетных IP-пакетов составляет 0,2 от значения ρ .

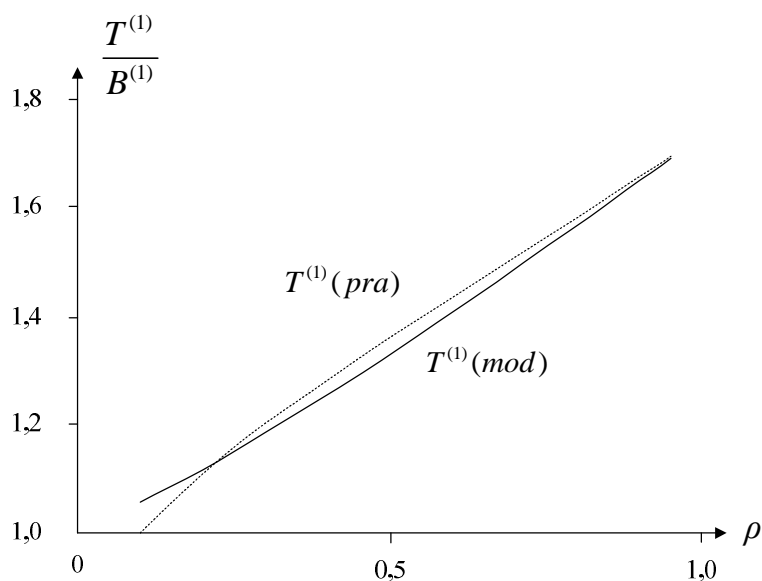


Рис. 6. Оценки среднего времени задержки приоритетных IP-пакетов

Сплошная линия показывает первую оценку исследуемой величины, полученную аналитически во второй главе диссертационной работы. Пунктирная линия показывает вторую оценку среднего времени задержки приоритетных IP-пакетов, которая была получена при выполнении имитационного моделирования. Численный анализ показал хорошее совпадение обеих оценок. Моделирование проводилось для доверительной вероятности 0,95.

Полученные результаты позволяют разработать основные рекомендации по расчету пропускной способности транспортных ресурсов и производительности маршрутизаторов сети NGN. Эти рекомендации основаны на вычислении требуемой интенсивности обслуживания μ . Сначала вычисляются два значения интенсивности обслуживания μ_{IPTD} и μ_{IPDV} , которые необходимы для обеспечения нормируемых вероятностно-временных показателей качества обслуживания трафика – $IPTD$ и $IPDV$ соответственно. Тогда величина требуемой интенсивности обслуживания μ будет определяться как $\max\{\mu_{IPTD}, \mu_{IPDV}\}$.

В Приложении к диссертационной работе приведен вклад в 12-ю Исследовательскую комиссию МСЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации исследованы вероятностно-временные характеристики качества обслуживания трафика в сети следующего поколения. Основные результаты данной работы сводятся к следующим положениям:

1. Предложены и обоснованы математические модели сети связи следующего поколения и ее основного компонента – узла коммутации (маршрутизатора). Эти модели представляют собой открытую сеть и однолинейную систему массового обслуживания соответственно. На вход каждой системы массового обслуживания поступает поток заявок произвольного вида. Время обработки заявок является постоянной величиной.
2. Разработан метод расчета параметров задержки IP-пакетов в маршрутизаторе сети связи следующего поколения. Этот метод позволяет получить аналитические выражения для вероятностно-временных характеристик качества обслуживания, нормированных в рекомендациях Международного союза электросвязи.
3. Исследовано поведение среднего значения времени задержки IP-пакетов и квантиля соответствующей функции распределения в маршрутизаторе. В процессе исследования проанализированы зависимости обеих величин от характеристик трафика, поступающего в маршрутизатор. Предложен метод оценки исследуемых характеристик при использовании приоритетной дисциплины обслуживания IP-пакетов.
4. Разработан метод, позволяющий рассчитывать параметры времени задержки IP-пакетов между двумя интерфейсами пользователь-сеть. Предлагаемый метод основан на анализе маршрутов передачи IP-пакетов, которые представляются в виде многофазных систем массового обслуживания.

5. Исследованы вероятностно-временные характеристики качества обслуживания в сети связи следующего поколения в зависимости от ее структуры, а также при различном характере обслуживаемого трафика. Результаты исследований позволяют определить максимальное количество маршрутизаторов между интерфейсами пользователь-сеть, что необходимо для разработки проектных решений по структуре сети NGN.
6. Разработаны имитационные модели маршрутизатора и тракта передачи IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть для проверки некоторых предположений, использованных для вывода аналитических соотношений. Результаты моделирования подтвердили корректность введенных допущений.
7. Сформулированы рекомендации для проектирования сети следующего поколения с точки зрения поддержки нормированных показателей качества обслуживания трафика.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Соколов А.Н., Яновский Г.Г. Оценка квантиля функции распределения времени задержки заявок в однолинейных системах массового обслуживания. – Инфокоммуникационные технологии, 2008, №4, с. 27 – 30 (*в перечне ВАК*).
2. Соколов А.Н. Оценка квантиля функции распределения времени задержки заявок в многофазных СМО. – Материалы 60 Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов 2008 года, СПбГУТ, с. 26.
3. Соколов А.Н. Метод оценки задержки IP пакетов в узле коммутации. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2009, №4(82), с. 37 – 40 (*в перечне ВАК*).
4. Sokolov A.N. Accuracy of the IP packet delay variation estimation. – IEEE Eurocon proceedings, 2009, pp. 1810 – 1813.
5. Sokolov A.N. Application of the step functions for the queuing system analysis. – Fifth FRUCT seminar proceedings, 2009, 5 p.
6. Соколов А.Н. Метод оценки производительности узлов коммутации для сетей связи следующего поколения. – Проблемы информатики, 2010, №2, с. 59 – 65.
7. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Однолинейные системы массового обслуживания. – СПб, издательство "Теледом" ГОУВПО СПбГУТ, 2010, 112 с.
8. Соколов А.Н. Приближенный метод анализа однолинейных систем массового обслуживания с постоянным временем обработки заявок. – Проблемы информатики, 2010, №3, с. 3 – 10.
9. Соколов А.Н. Использование ступенчатых функций для описания входящего потока заявок в однолинейной системе массового обслуживания. – Материалы 62 Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов 2010 года, СПбГУТ, с. 57 – 58.
10. Соколов А.Н. Оценка параметров задержки пакетов высшего приоритета в IP-сетях. – Электросвязь, 2011, № 5, с. 21 – 24 (*в перечне ВАК*).
11. Соколов А.Н. Оценка характеристик качества обслуживания трафика между интерфейсами пользователь-сеть. – Материалы 63 Научно-технической конференции

профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов 2011 года, СПбГУТ, Часть 1, с. 150 – 152.

12. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Особенности трафика в сети следующего поколения. – Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем". М.: РУДН, 2011, с. 120 – 123.

Подписано к печати 16.06.2011.

Объем 1 печ.л. Тираж 80 экз. Зак.

Тип. СПбГУТ, 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61