

**Московский Физико-Технический Институт  
(Государственный Университет)**

*На правах рукописи*

**Гончаров Андрей Андреевич**

**Исследование условий обеспечения гарантированного  
качества обслуживания в сети Интернет**

Специальность 05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2007

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникационных технологий  
Московского физико-технического института (ГУ).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
Семёнов Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник  
Ляхов Андрей Игоревич

кандидат технических наук, доцент  
Кулагин Михаил Викторович

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации –  
Российский научный центр «Курчатовский институт»

Защита состоится «22» мая 2007 г. в 15:30 на заседании диссертационного  
совета К212.156.04 при Московском физико-техническом институте (ГУ) по  
адресу: 141700, г. Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., д.9,  
ауд. 204 Нового корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-  
технического института (ГУ).

Автореферат разослан «16» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Куклев Л.П.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Эффективность использования полосы пропускания канала всегда была актуальной задачей, но её важность возросла в последние годы в связи с появлением всё более жестких требований к качеству обслуживания (QoS).

Для обеспечения необходимых требований к различным потокам данных используются два метода QoS: управление перегрузкой (congestion management) и предотвращение перегрузок (congestion avoidance). Первый метод основан на присвоении квот и приоритетов потокам, и в случае перегрузки, потоки получают качество, ограниченное их квотой и приоритетом (например, WFQ- Weighted Fair Queuing). Второй метод ограничивает размер очереди, сигнализируя источникам данных о необходимости уменьшить скорость передачи информации (например, WRED - Weighted random early detection).

Ведётся активное исследование в области методов, ограничивающих размер очереди. Можно перечислить лишь некоторые, наиболее известные модификации алгоритма RED<sup>1</sup>: WRED, GRED (Gentle RED), DRED (Dynamic RED), SRED (Stabilized RED), ARED (Adaptive RED), RED-PD.

Отдельно следует упомянуть учёных, которые первыми начали решать проблему предотвращения и борьбы с перегрузками: Салли Флойд (Sally Floyd), Ван Якобсон (V. Jacobson), Кевин Фолл (Kevin Fall), Ратул Махаджан (Ratul Mahajan), Мартин Мэй (Martin May), Жан Болот (Jean Bolot), Вишал Мисра (Vishal Misra), Вейбо Гонг (WeiBo Gong), Дон Тоуслей (Don Towsley), Томас Зейглер (Thomas Ziegler), Давид Везерол (David Wetherall), Добрушин Р.Л., Кузнецов Н.А., Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Богуславский Л.Б., Дрожжинов В.И., Башарин Г.П., Бочаров П.П..

В работе изучается процесс использования, алгоритма WRED, так как этот механизм реализован практически во всех современных маршрутизаторах, а остальные его модификации лишь бурно обсуждаются и не имеют практической реализации в сетевых устройствах.

Несмотря на внушительный объём публикаций по теме предотвращения перегрузок, остается проблема выбора настроек параметров для алгоритма WRED. Многие исследователи WRED согласны с тем, что влияние алгоритма на качество передачи потоков сильно зависит от правильного задания его параметров, но до сих пор нет вразумительной инструкции, как на практике выбирать значения этих параметров. В данной работе не выдвигается никаких предположений относительно типа распределения входного трафика, с помощью моделирования в NS-2 и эксперимента выводятся оптимальные параметры работы WRED.

1. Floyd S., Jacobson V., «Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance», IEEE/ACM Transactions on Networking, pp.397- 413, August 1993

К числу параметров качества обслуживания следует отнести доступную полосу пропускания, вероятность потери пакета, разброс времени доставки и само время доставки пакета от отправителя до получателя. Все эти параметры зависят от алгоритмов формирования и обслуживания очередей пакетов в сетевых устройствах (переключателях и маршрутизаторах). В современных сетевых устройствах применяются алгоритмы RED/WRED (random early detection/weighted random early detection), PQ (priority queueing), WFQ (weighted fair queueing), LLQ (low latency queueing), CBWFQ (class based weighted fair queueing) и т.д. В данной работе выполнено практическое исследование модели DiffServ (Differentiated Services – механизм который в зависимости от требований к качеству обслуживания записывает в IP заголовки пакетов специальные метки DSCP - Diff-Serv Code Point, значение которых учитывается сетевым оборудованием при передаче пакета через сеть) в том виде, как она реализована в сетевом оборудовании на сегодняшний день. В результате исследований современных средств обеспечения качества обслуживания (QoS, DiffServ, MPLS-TE - Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering, RSVP-TE) были сформулированы практические рекомендации для сервис-провайдеров, желающих предоставить определенные параметры качества обслуживания своим клиентам (полосу пропускания, гарантированную задержку и ее дисперсию, минимальную вероятность потери пакетов).

В рамках измерений и моделирования виртуального канала (с привлечением программного пакета NS-2) показано, что при некоторых конфигурационных параметрах возможны осцилляции длины очереди (особенно для потоков среднего и низкого приоритета). Этот эффект связан с механизмом вычисления усредненного значения длины очереди в алгоритмах WRED и RIO (RED with Input Output). Такие осцилляции могут привести к росту дисперсии RTT (Round Trip Time - сумма времен доставки сегмента от отправителя до получателя и отклика от получателя до отправителя), что крайне нежелательно для работы с мультимедийными данными и при решении задач управления в реальном масштабе времени. Осцилляции усредненной длины очереди понижают также эффективность использования канала. Выработаны рекомендации и получены аналитические оценки значений конфигурационных параметров, минимизирующих влияние этого явления. Определена зависимость амплитуды этих осцилляций и постоянной затухания от  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $p_c$ ,  $w_q$  и отношения  $\lambda/\mu$  (квота полосы), где  $T_1$  и  $T_2$  - нижний и верхний порог отбрасывания WRED,  $p_c$  - максимальная вероятность отбрасывания,  $w_q$  - коэффициент усреднения,  $\lambda/\mu$  - коэффициент перегрузки канала, где  $\lambda$  - интенсивность входящего потока, а  $\mu$  - полоса пропускания потока в выходном канале. Коэффициент перегрузки канала задаётся с помощью механизма WFQ. В рамках данного исследования механизм WFQ позволяет задавать квоту полосы канала, доступную для приоритетного потока. Для очередей с высоким приоритетом усредненная длина очереди не должна

превышать уровня  $T_2$ , иначе возникают осцилляции длины очереди и, как следствие, принудительное отбрасывание пакетов. Анализ осцилляций очередей показал, что следует внимательно относиться к выбору параметров протокола WRED и WFQ (квоты полосы канала). В противном случае ресурсы канала будут использоваться неэффективно. Неоптимальный выбор  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $w_q$  и  $p_c$  может существенно увеличить дисперсию RTT, и вероятность потери пакетов. Разработан комплекс программ для измерения параметров качества обслуживания (полосы пропускания, RTT, дисперсии RTT и вероятности потери пакетов, а также корреляций этих характеристик), расчета характеристик осцилляций усредненной длины очереди и графического отображения эволюции параметров QoS.

**Цель диссертационной работы** - исследование методов обеспечения гарантированного качества обслуживания для привилегированных субпотокков и поиск оптимальных параметров работы алгоритма WRED. В задачи исследования входило:

1. Разработка рекомендаций по проектированию и диагностике сетей для обеспечения требуемого качества обслуживания потоков, проходящих через сеть Интернет (рассматриваются следующие параметры качества обслуживания: полоса пропускания, RTT, дисперсии RTT и вероятности потери пакетов, а также корреляции этих характеристик). Исследование влияния осцилляций длин очередей в буферах маршрутизаторов на значения параметров качества обслуживания
2. Разработка средств измерения параметров качества обслуживания в Интернет.
3. Разработка алгоритма измерения процента потерь пакетов в удалённых сетевых сегментах для отслеживания качества предоставленных услуг.
4. Разработка алгоритма для выявления причин потерь пакетов в сетевом канале. (Потери из-за переполнения буферов в сетевых устройствах по пути следования или повреждение пакетов при транспортировке).
5. Разработка методик оптимизации конфигурационных параметров для получения нужных параметров QoS.
6. Моделирование процессов в сети Интернет, влияющих на качество обслуживания.
7. Сопоставление результатов моделирования и результатов измерений с целью выявления влияния различных факторов QoS.

**Научная новизна.** В представленной работе предлагаются два новых метода отслеживания качества обслуживания в удалённых сегментах сети.

1. Первый метод позволяет с помощью одной рабочей станции, в реальном масштабе времени, круглосуточно оценивать работу удаленных сетевых сегментов. В качестве параметра, характеризующего качество работы сегмента, используется процент пакетов, потерянных в сегменте.

2. Вторым методом позволяет выявить участки сети, содержащие источники наводок и искажений. Вторым методом основывается на зависимости вероятности потери пакета от длины пакета. Он позволяет определять характер потерь пакетов (потерь, сопряженных с искажениями передаваемых кадров).

3. Впервые произведено подробное исследование причин и следствий осцилляций длин очередей в буфере маршрутизатора. Определено влияние осцилляций на параметры качества обслуживания. 4. Предложены методы минимизации осцилляций длин очередей в буфере маршрутизатора.

5. Решена проблема идентификации откликов при использовании нескольких независимых потоков ICMP.

6. Впервые проведено всестороннее сравнение результатов моделирования и результатов экспериментов. Показана возможность получения требуемых параметров качества обслуживания в условиях высокого уровня перегрузки канала.

7. Измерен уровень искажений видеоизображения при разных значениях перегрузки канала, а также зависимость искажений для разных видео-сюжетов.

**Практическое значение работы.** Определяется возможностью практического применения предложенных методов в существующих и создаваемых локальных сетях. Предложенные методы позволяют повысить эффективность обслуживания приоритетных потоков посредством оптимальной настройки алгоритмов обслуживания очередей.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались:

- на научных конференциях Московского Физико-технического института (г. Долгопрудный) в 2002, 2004, 2005, 2006 гг.
- на школе-семинаре по компьютерной автоматизации и информатизации, ACS`2002 (г. Москва 2002 г.)
- на III Международной Конференции "Интернет нового поколения - IPv6" (г. Москва 2004 г.)

## **Положения, выносимые на защиту.**

1.Рекомендации по проектированию и диагностике сетей для обеспечения требуемого качества обслуживания потоков, проходящих через сеть Интернет. Результаты исследования влияния осцилляций длин очередей в буферах маршрутизаторов на значения параметров качества обслуживания

2.Средства диагностики и методы измерения параметров качества обслуживания в Интернет.

3.Методика оптимизации конфигурационных параметров для получения нужных значений параметров QoS.

4.Результаты моделирования процессов в сети Интернет, влияющих на качество обслуживания.

5.Результаты сопоставления моделирования и результатов измерений.

**Публикации по теме работы.** Результаты диссертации опубликованы в 12 работах из которых 5 работ в электронных журналах, 6 публикаций в виде тезисов докладов на конференциях, 1 публикация в печатном виде в научно-техническом журнале.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации 117 страниц, приведено 98 рисунков, 9 таблиц. Список литературы включает 65 наименований.

## **Содержание работы**

**Во Введении** приводятся названия существующих алгоритмов и технологий QoS. Приводится список Зарубежных и отечественных учёных занимавшихся проблемой обеспечения качества обслуживания.

**В первой главе** приводится краткий обзор литературы по теме диссертации, приводится обзор того, что было сделано в мире по данной теме, формулируется постановка задачи и цель работы. В основе рекомендаций для обеспечения требуемого качества обслуживания потоков лежит оптимальный выбор параметров для алгоритмов управления очередями WFQ и WRED. Исследовались возможности механизмов WRED и WFQ и влияние конфигурации этих алгоритмов на качество услуг. Для подбора параметров использовались результаты экспериментальных измерений в тестовом канале и в программе моделирования NS-2. Для решения задачи анализировались различные модели доставки пакетов в рамках протоколов ICMP, UDP и TCP. Для каждого потока задавался набор параметров:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $p_c$ ,  $w_q$ ,  $\lambda/\mu$ . Для каждого субпотока задавался процент доступной полосы пропускания (настройка WFQ). В экспериментах строились зависимости разных параметров QoS (потерь, задержек RTT) при изменении одного из параметров WFQ или WRED. После измерения и сравнения всех возможных случаев делается вывод об оптимальной настройке параметров WRED и WFQ.

**Во второй главе** описываются два механизма удалённой диагностики локальных сетей. Проблема обеспечения качества обслуживания многогранна, и в ранних исследованиях изучался вопрос о выявлении проблемных участков сети, в которых происходят потери пакетов, исследовался механизм накопления потерь пакетов. В рамках данного исследования было разработано два алгоритма удалённой диагностики локальных сетей. Эти алгоритмы, опробованные на практике [5,6,7], они позволяют находить в сети проблемные участки, которые могут сильно влиять на качество передачи данных через эти участки.

Первый из рассмотренных нами алгоритмов позволяет с помощью одной рабочей станции, в реальном масштабе времени, круглосуточно оценивать работу удаленных сетевых сегментов. В качестве параметра, характеризующего качество работы сегмента, используется процент пакетов, потерянных в сегменте.

Второй рассмотренный алгоритм основывается на зависимости вероятности потери пакета от длины пакета. Его можно считать полезным диагностическим средством при исследовании свойств каналов и выявлении доли потерь, сопряженных с искажениями передаваемых кадров. Эта методика позволяет выявить участки сети или канала, содержащие источники наводок и искажений. Полезным может быть сравнение зависимости вероятности потери пакета от его длины, полученной для одного и того же канала в разные моменты времени. На рис. 1 представлена схема, поясняющая работу первого алгоритма.

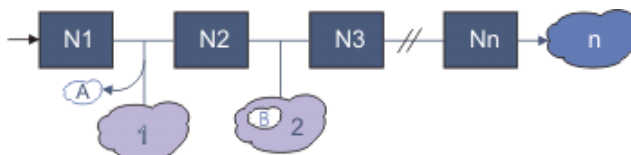


Рис. 1. Схема измерений

$N1, N2, \dots, Nn$  – активные сетевые устройства, т.е. такие приборы, где происходит буферизация пакетов и возможна их потеря.

$A, B, \dots$  – это подмножество машин из сетевых сегментов  $1, 2, \dots, n$ , чьи сетевые интерфейсы не очень загружены (например, слабо загруженные рабочие станции).

Тестовая ЭВМ находится в сегменте, подключенном к сетевому устройству  $N1$ . На ЭВМ установлена программа, которая последовательно посылает ICMP запросы к подмножествам  $A, B, \dots$  машин из сегментов  $N1, N2, \dots, Nn$ . Та же тестовая ЭВМ обрабатывает ICMP отклики, пришедши из сегментов. ICMP отклики имеют ту же длину, что и ICMP запросы. Считается, что вероятности потери в промежуточном устройстве для запроса и отклика во время эксперимента не меняются и равны между собой.

Если на вход канала в  $N1$  поступило  $S$  пакетов, направленных в субсеть  $n$ , то из  $N1$  в  $N2$  поступит  $S \cdot (1 - \alpha_1)$ , где  $\alpha_1$  - вероятность потери пакета в активном устройстве  $N1$ .



По аналогии получим выражение для количества пакетов, дошедших до сегмента  $n$  и вернувшихся обратно отправителю – тестовой ЭВМ:

$R = S \cdot (1-\alpha_1)^2 \cdot (1-\alpha_2)^2 \cdot (1-\alpha_{n-1})^2 \cdot (1-\alpha_n)$ , где  $\alpha_n$  – процент потерянных пакетов в удаленном сегменте  $n$ .

Степень 2 возникает из-за того, что пакеты могут теряться в сетевых устройствах как по пути туда, так и обратно. При этом предполагается, что вероятности потери пакета на пути туда и обратно равны. При отправке отклика из машины сегмента  $n$  потеря невозможна, по этой причине сомножитель  $(1-\alpha_n)$  представлен в первой степени. На практике измеряются величины  $(1-\alpha_1)^2, (1-\alpha_2)^2, \dots$ .

Из базы данных берётся информация о принадлежности того или иного IP-адреса ЭВМ к представляющему интерес сегменту и производится зондирование всех машин субсети. Каждая ЭВМ зондируется последовательно сериями по три пакета. Если все три пакета не дали отклика, машина считается выключенной, и эти данные не учитываются при оценке вероятности потери пакета. Такой подход приводит к определенному занижению вероятности потерь, но эффект незначителен, так как  $\alpha_3$  даже при вероятности потери  $\alpha = 0,1$  составляет лишь 0,1%, и его влиянием можно пренебречь. При измерениях не происходит завышения вероятности потерь пакетов за счет отключенных в данный момент ЭВМ.

Рассмотренный алгоритм позволяет удаленно измерить вероятность потери пакетов для сетевого сегмента, если известен список IP-адресов этого сегмента и в каждом из сетевых устройств по пути имеется интерфейс, где можно оценить потери в этом конкретном сетевом устройстве. Такая ситуация обычно легко реализуется внутри локальной сети, а также в опорных сетях сервис провайдеров.

Второй алгоритм позволяет выявить причины потери пакетов в транспортном сетевом канале. Причинами потери могут быть переполнения буферов в сетевых устройствах по пути следования и повреждения пакетов при транспортировке.

Если потери сопряжены с искажениями пакетов при транспортировке, то зависимость вероятности потерь  $P_L$  от длины  $L$  пакета должна характеризоваться зависимостью  $P_L = L(1-p(1-p)^L)$ , где  $p$  – вероятность повреждения одного бита (BER - Bit Error Rate),  $L$  – количество бит в пакете, и имеет размерность штук.

С учетом того, что BER лежит в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-10}$ , а  $L > 512$  бит, при малых  $L$  имеет место приближённая формула  $P_L = (1 - p(1-L \cdot p + 0,5 \cdot p^3 L(L-1)))$ . Таким образом, можно приближённо ожидать квадратичную зависимость вероятности потерь от длины пакета для малых  $L$ . Это обстоятельство можно использовать для анализа свойств каналов и причин измерения вероятности потерь.

Измеряя зависимость вероятности потерь от длины пакета и, аппроксимируя ее методом наименьших квадратов, можно

идентифицировать причины потерь. Были проведены исследования потерь пакетов для двух маршрутов. Для канала ПРАН - Санкт-Петербургское математическое общество и ПРАН – (ИММ) Екатеринбург. Были проведены измерения вероятности потери для длин пакетов 64, 128, 256, 512, 1024 и 1450 байт. Для каждой из длин было послано по 2000 ICMP-пакетов. Результаты измерений показаны на рис. 2. и 3.

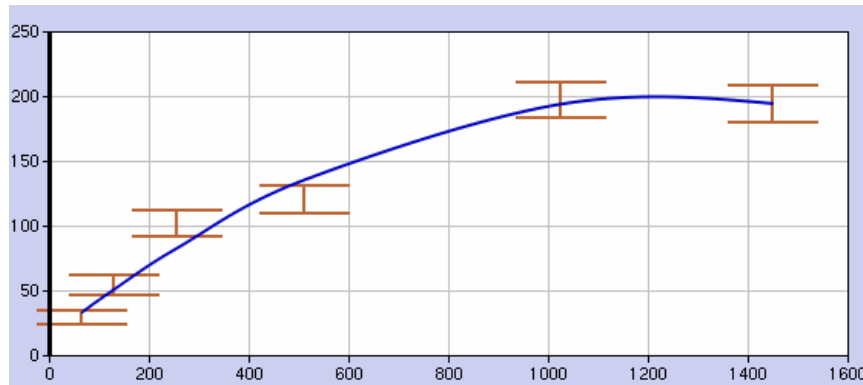


Рис. 2. Зависимость числа потерянных пакетов (из 2000 посланных пакетов) от длины пакета для маршрута ПРАН – Санкт-Петербургское математическое общество. По вертикали отложено число потерянных пакетов, по горизонтальной оси отложена длина пакетов в байтах

В общем виде имеет место утверждение:  $C_{path} = P_L + F(L)$ , где  $C_{path}$  полная вероятность потери пакета на всём маршруте,  $L$ - число бит в пакете.

Аппроксимация полиномом второй степени по методу наименьших квадратов дает следующую зависимость вероятности потери пакета от его длины.

$$C_{path} = (14,33 \pm 6) + (0.298 \pm 0.04) \cdot L - (0.00012 \pm 3 \cdot 10^{-5}) \cdot L^2$$

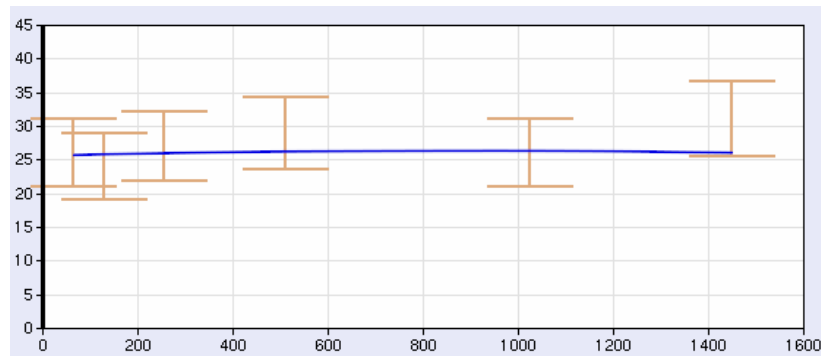


Рис. 3. Зависимость числа потерянных пакетов (из 2000 посланных пакетов) от длины пакета для маршрута ПРАН – ИММ (Екатеринбург). По вертикальной оси отложено число потерянных пакетов, по горизонтальной оси отложена длина пакетов в байтах

Для второго случая зависимость полной вероятности потери пакета от его длины может быть приближено следующей формулой.

$$C_{path} = (25.56 \pm 4.42) + (0.00167 \pm 0.01) \cdot L - (9.46 \cdot 10^{-7} \pm 1.23 \cdot 10^{-5}) \cdot L^2$$

Значение вероятности потери пакетов для пакетов интересующей длины можно получить из рис. 2 и 3, поделив число потерянных пакетов на общее число отправленных пакетов (для каждой длины отправлялось 2000 пакетов).

Сравнение результатов показывает, что в случае на рис. 2 заметное влияние на потери оказывает повреждение пакетов в пути. В случае на рис. 3 - вероятность потери определяется переполнением буфера, емкость которого задается в сегментах.

Отсюда можно сделать вывод, что исследование зависимости вероятности потери от длины пакета можно считать полезным диагностическим средством при исследовании свойств каналов и выявлении потерь, сопряженных с искажениями передаваемых кадров. Эта методика позволяет выявить участки сети или канала, содержащие источники наводок и искажений. Полезным может быть сравнение зависимостей вероятности потери пакета от его длины, полученных для одного и того же канала в разное время.

**В третьей главе** описаны результаты экспериментов по обеспечению QoS в среде моделирования NS-2. Цель данного моделирования - разработка дополнительных средств измерения и анализа параметров QoS. Мы также хотели исследовать возможность применения модельных методов оценки параметров качества обслуживания.

- 1) Проведены исследования алгоритмов RIO-C и WRED для разных моделей назначения порогов. Было также исследовано влияние алгоритмов-диспетчеров на предоставляемое качество обслуживания. Установлены оптимальные границы работы алгоритмов WRED и RIO, при которых использование этих алгоритмов является наиболее эффективным.
- 2) К встроенным в NS-2 функциям были добавлены утилиты для расчета и отображения значений средневзвешенных очередей и вероятности отбрасывания пакетов. Это было необходимо для изучения и интерпретации поведения нашей тестовой сети.
- 3) Получены зависимости длин очередей от времени, длин средневзвешенных очередей от времени и вероятности отбрасывания пакетов от времени. Выполнен также анализ этих зависимостей и выработаны рекомендации по установке параметров алгоритмов WRED и RIO для достижения оптимальной работы (для модели).
- 4) Произведён подбор параметров модели виртуальной сети таким образом, чтобы она адекватно отражала работу тестовой сети. Было произведено полномасштабное моделирование для широкого набора параметров, были получены условия, при которых модель и эксперимент на реальной сети ведут себя подобным образом.

Моделирование показало, что при некорректном выборе параметров, например фактора усреднения можно получить довольно широкие вариации длины очереди, которые в свою очередь могут в несколько раз увеличить дисперсию RTT. Задачей моделирования было выявление области параметров управления очередью, при которых осцилляции длины очереди минимальны, а усреднение приемлемо. Показанное моделирование

продемонстрировало последствия неоптимального подбора параметров и наши возможности наблюдения за этими параметрами в среде моделирования NS-2.

Усреднение длины очереди является важным компонентом алгоритма управления процессом буферизации. Без усреднения процесс буферизации был бы подвержен сильному влиянию случайных флуктуаций входного потока пакетов. Но именно усреднение является причиной возникновения осцилляции длины очереди. Ведь зависимость принятия решения об отбрасывании того или иного пакета определяется значением усреднённой длины очереди, которое может сильно отличаться от текущего значения длины очереди. Амплитуда вариации текущего значения длины очереди существенно больше усреднённого. Расчёты показывают, что при определённых параметрах текущая длина очереди может достигать в максимуме полного объёма буфера, а в минимуме нуля (т.е. буфер уже пуст, а отбрасывание пакетов продолжается см. рис. 4).

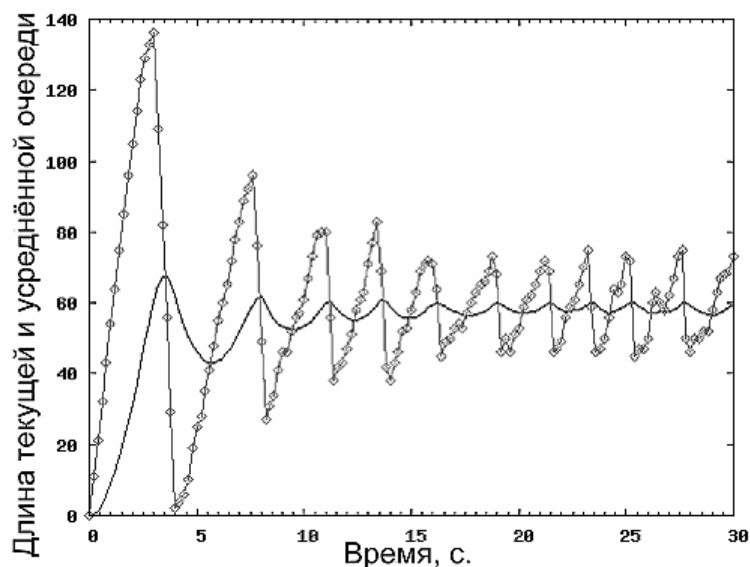


Рис. 4. Зависимость от времени  $\bar{Q}$  и  $Q$  ( $w_q=0,002$ ;  $p_c=0,2$ ;  $T_1=25$ ;  $T_2=60$ ; размер буфера = 800; время эксперимента 30 с.; перегрузка  $\lambda/\mu=1,4$ )

На рис. 4 ромбиками отмечена зависимость текущего значения длины очереди от времени. Отсюда видно, что усредненные значения длины очереди на начальном участке зависимости уступают текущей длине более, чем в два раза. В расчётах входной поток  $\lambda$  и выходной  $\mu$  задавались в битах в секунду. В области от 0 до  $T_1$  рост длины очереди определяется произведением  $(\lambda-\mu)t$ . После достижения уровня  $T_1$  скорость роста длины очереди замедляется, так как часть пакетов отбрасывается, зависимость становится квадратичной. Прекращение роста и начало спада  $Q$  происходит в момент, когда  $\bar{Q}$  достигает уровня  $T_2$ . Расчёты проводились с привлечением пакета программ NS-2. Значения  $T_1$  и  $T_2$  задавались в пакетах.

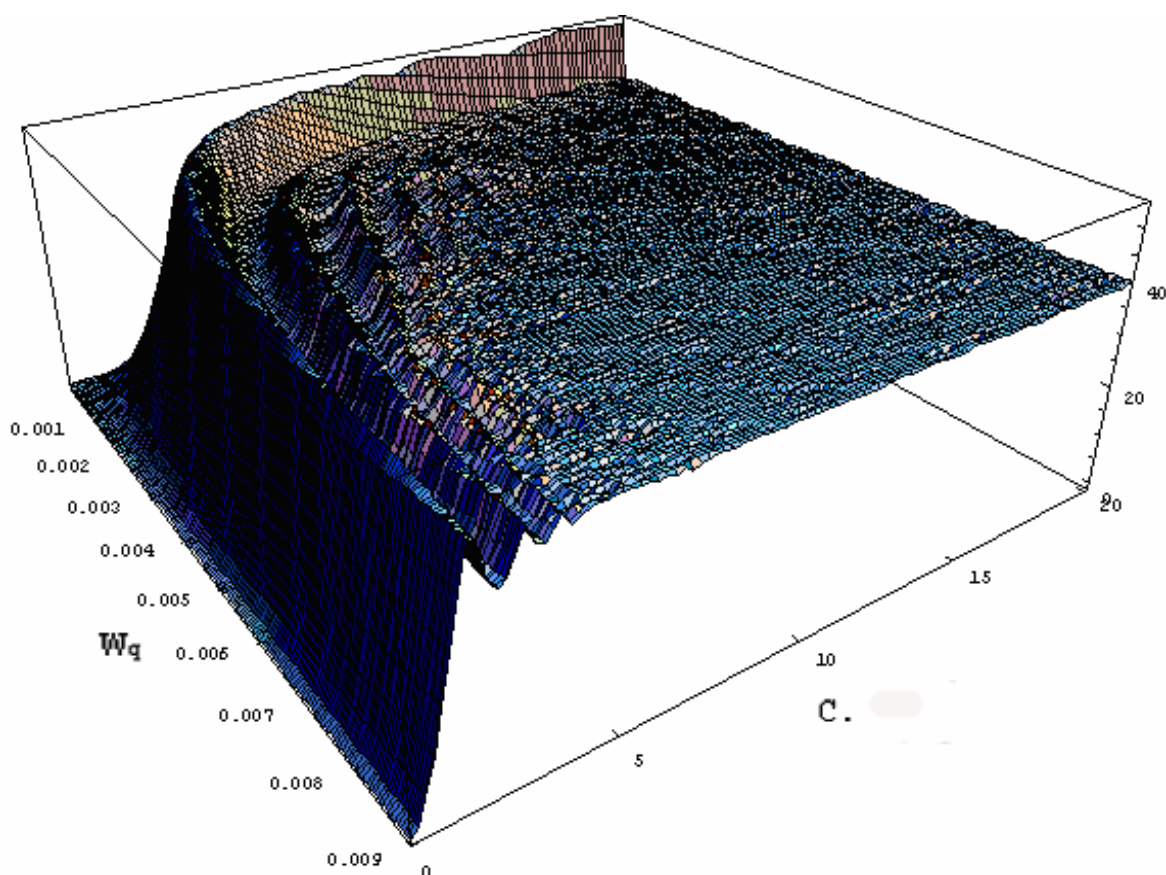


Рис. 5. Зависимость  $\bar{Q}$  от фактора усреднения  $w_q$

На рис. 5 показана зависимость осцилляций длины очереди от фактора усреднения  $w_q$ . ( $T_1=25$ ,  $T_2=40$ ,  $\lambda/\mu=1,4$ ,  $p_c=0,1$ ). Из рисунка видно, что приемлемые значения лежат в области  $w_q > 0,003$ . При меньших значениях  $w_q$  осцилляции не затухают даже через 10 с после начала перегрузки. Равновесное значение  $\bar{Q} \sim T_2=40$ .

Оптимальный выбор параметров алгоритма WRED позволяет увеличить эффективность использования буферов маршрутизатора и, как следствие, поднять пропускную способность или улучшить уровень QoS. Подобным образом проводились вариации всех параметров WRED.

Из полученных данных был сделан вывод, что приемлемый набор параметров с точки зрения осцилляций длины очереди соответствует:  $p_c < 0,4$ ;  $1,2 < \lambda/\mu < 1,5$ , и  $w_q > 0,003$ .

**В четвёртой главе** описаны результаты экспериментов по поиску оптимальных параметров WRED в тестовом канале для обеспечения заданного QoS.

В третьей главе рассматривалась возможность построения виртуальных сетей на основе протокола MPLS с гарантированным качеством обслуживания (DiffServ - QoS). Для решения задачи анализировались различные модели доставки пакетов в рамках протоколов ICMP, UDP, TCP. На рис. 6 приведена схема тестового канала. Виртуальный канал проходил от тестовой ЭВМ в ПРАН через маршрутизатор CISCO-7206, интерфейс ATM, далее через сеть ATM в

коммутатор CISCO-6506 в Институте Атомной Энергии и переключатель в другую тестовую машину.

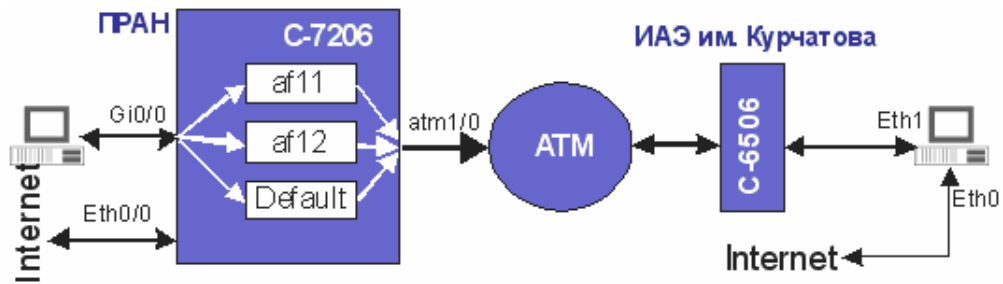


Рис. 6. Схема тестовой сети для исследования параметров QoS

Между маршрутизатором CISCO-6506 и тестовой машиной со стороны ИАЭ размещался переключатель канального уровня. Это устройство было крайне слабо загружено и по этой причине не оказывало влияния на результаты измерения. Целью данной работы являлась разработка методики оптимальной оценки QoS и опробование ее на практике. Надо было выяснить, какие реальные параметры качества обслуживания достижимы при определенных конфигурационных характеристиках сетевых устройств, как влияет на качество передачи факт наличия приборов, не поддерживающих DiffServ, например, переключателей канального уровня. Рассматривалась возможность адаптации конфигураций маршрутизаторов, поддерживающих DiffServ к конкретным условиям. Виртуальный канал (VPN) между C-7206 (ГРАН) и C-6506 (ИАЭ) через сеть ATM имел ограничение полосы - 2 Мбит/с, что облегчало создание закритических режимов с точки зрения перегрузки. Кроме того, маршрутизаторы были сконфигурированы для обеспечения поддержки QoS (DSCP). Измерялось поведение системы при всех возможных случаях настроек параметров WRED в маршрутизаторе. Исследовалось также влияние коэффициента перегрузки  $\lambda/\mu$  на поведение алгоритма предотвращения перегрузок WRED. В эксперименте скорость отправки пакетов источником была постоянна и равнялась  $\lambda[\text{бит/с}]=\text{const}$ . Обозначим через  $x(k)$  – скорость поступления пакетов в буфер маршрутизатора в  $k$ -ый временной интервал, а  $y(k)$  – скорость передачи пакетов на выходном интерфейсе маршрутизатора. Введем обозначения:  $\bar{q}$  - средневзвешенная длина очереди,  $q$  - текущая длина очереди.  $T_1$  – нижний порог в алгоритме WRED.  $T_2$  – верхний порог в алгоритме WRED,  $p_c$  - максимальная вероятность отбрасывания,  $w_q$  - коэффициент усреднения,  $\mu$  - полоса пропускания потока в выходном канале. Усреднение длины очереди производится согласно формуле:

$$\bar{q}(k+1) = (1 - w_q)\bar{q}(k) + w_q q(k), \quad (1)$$

где  $\bar{q}(k+1)$ - усредненная длина очереди в  $(k+1)$ -й момент времени.

Вероятность потери пакета  $p(k)$  выражается известной формулой:

$$p(k) = \begin{cases} 0, & \bar{q}(k) < T_1 \\ p_c \left( \frac{\bar{q}(k) - T_1}{T_2 - T_1} \right), & T_1 \leq \bar{q}(k) < T_2 \\ 1, & \bar{q}(k) \geq T_2 \end{cases} \quad (2)$$

Скорость поступления пакетов в буфер маршрутизатора характеризуется выражением:

$$x(k) = (1-p(k))\lambda \quad (3)$$

Скорость передачи пакетов из интерфейса маршрутизатора в канал описывается соотношением:

$$y(k) = \min((1-p(k))\lambda, \mu) \quad (4)$$

Текущая длина очереди в  $k$ -й временной интервал и длина очереди в последующий момент времени связаны соотношением:

$$q(k+1) = \min[\max\{q(k) + (x(k) - \mu)\Delta t, 0\}, L], \quad (5)$$

где  $L$ -максимальный размер пакетного буфера для интерфейса в маршрутизаторе,  $\Delta t$  – приращение времени между двумя последовательными поступлениями пакетов. Из выражений (1) и (5) можно получить оценку  $\bar{q}(k+1)$  для значений  $w_q \ll 1$ . На основе (3), (4) и (1) запишем:

$$\bar{q}(k+1) = (1 - w_q)^{(x(k)-y(k))\Delta t} \bar{q}(k) + (1 - (1 - w_q)^{(x(k)-y(k))\Delta t}) q(k)$$

При  $w_q \ll 1$ .

$$(1 - w_q)^{(x(k)-y(k))\Delta t} \approx 1 - (x(k) - y(k))\Delta t w_q \quad (6)$$

В результате получаем:

$$\bar{q}(k+1) \approx \bar{q}(k) + (x(k) - \mu)\Delta t w_q (q(k) - \bar{q}(k)) \quad (7)$$

Из (7) следует, что в стационарном режиме, когда колебания средневзвешенной длины очереди затухают, прекращаются и колебания текущей длины очереди. Следовательно, из (7) имеем:  $\bar{q}(k+1) \approx \bar{q}(k)$ ,

$$(q(k) - \bar{q}(k)) = 0, \Rightarrow q(k) = \bar{q}(k) \quad (8)$$

В стационарном случае задержка постоянна, и пропорциональна текущей длине очереди.

При измерении влияния  $\lambda/\mu$  на параметры QoS через ATM канал передавался один поток UDP (User Datagram Protocol) пакетов, с длиной поля данных 1024 байта, поток помечался меткой DSCP=AF11. Полоса пропускания ATM канала оставалась постоянной и равнялась  $\mu=998$  Кбит/с., а скорость передачи отправителем варьировалась. Параметры настройки алгоритма WRED для этого потока были следующими:  $T_1=100$ ,  $T_2=150$ ,  $p_c=1$ ,  $w_q=0,002$ . Выбор именно этих параметров основывался на результатах моделирования. Длительность одного измерения составляла 39 секунд. Отношение  $\lambda/\mu$  варьировалось в пределах от 0,79 до 3,41. Для каждого измерения получена зависимость задержки доставки пакета от времени с начала эксперимента. Была построена зависимость процента потерь от времени с момента начала измерения.

Исследовалось влияние порогов  $T_1$  и  $T_2$  на параметры качества обслуживания. Пороги влияют на минимальное и максимальное время задержки пакетов в случае возникновения перегрузки. Во время эксперимента коэффициент перегрузки  $\lambda/\mu$  оставался постоянным и равнялся 1,4. Нижний порог алгоритма WRED-  $T_1 = 100$  [пакетов] тоже не менялся. Менялось значение верхнего порога  $T_2 = 110-210$  пакетов с шагом 10 пакетов. Не имело смысла ставить большое значение порога  $T_2$ , так как при длительной перегрузке происходило переполнение буфера, отведённого на выходном интерфейсе маршрутизатора под пакетную очередь. Для двух крайних значений параметра  $p_c$  были получены зависимости значения средней задержки на плато и время выхода системы на плато от значения  $T_2$ . Измерена также зависимость максимальной задержки при передаче пакета. Данная задержка возникает во время переходного процесса, размер этой задержки зависит от значения порога  $T_2$  и параметра усреднения  $w_q$ .

Исследовалось влияние параметра усреднения  $w_q$  на поведение алгоритма WRED. Параметр  $w_q$  отвечает за амплитуду колебаний длин очередей, а также за время реакции алгоритма WRED на флуктуации перегрузки. Через ATM канал передавался один поток UDP пакетов, с длиной поля данных 1024 байта, поток помечался меткой DSCP=AF11. Отношение  $\lambda/\mu$  в ходе эксперимента оставалось постоянным и равнялось 1,4. Параметры настройки алгоритма WRED для этого потока были следующими:  $T_1 = 100$ ,  $T_2 = 150$ ,  $p_c = 0,1$

В главе 3 также приведены результаты эксперимента по изучению возможности получения гарантированного качества обслуживания при передаче мультимедиа через перегруженные каналы. Проведены измерения зависимости качества обслуживания (вероятности потери пакетов и PSNR - *Peak Signal-to-Noise Ratio*) от параметров алгоритма WRED и значений квот на выходе буферов.

Широкое внедрение IP-телефонии, цифрового ТВ поверх Интернет, P2P ТВ и других мультимедиа приложений ставит проблему обеспечения гарантированного качества передачи в условиях кратковременных и долговременных перегрузок. В настоящее время, наиболее распространённый способ предотвращения тяжелых перегрузок является алгоритм WRED. Мы исследовали влияние алгоритма WRED на качество передачи потокового видео: задержку при передаче, потерю и искажения кадров.

Через тестовый канал передавалось одновременно три одинаковых видеоролика. Видеоролики были закодированы в формате MPEG-4. Транспортным протоколом при передаче видеороликов служил протокол RTP/UDP.

На практике оценивалось влияние параметров WRED и некоторых других конфигурационных параметров канала на качество передачи видефрагмента (QoS). Было выполнено исследование влияния коэффициента перегрузки канала на качество передаваемого видео потока.



Анализировалось влияние долговременных перегрузок на качество передачи потокового видео. Цель эксперимента заключалась в исследовании границ приемлемой перегрузки для передачи потокового видео. Как бы ни был перегружен канал, часть кадров из видео потока дойдут до получателя. Исследовалась граница перегрузки канала, при которой имело смысл транслировать видео ролик по сети. Были определены параметры качества для разных передаваемых видео сюжетов. В качестве первого сюжета использовалась запись новостей со слабо меняющимся задним фоном. Затея с разными сюжетами понадобилась потому, что для передачи разных сюжетов с одинаковым качеством допустимы разные уровни перегрузки канала. В качестве второго сюжета была выбрана запись игры в регби с динамично меняющимся содержимым кадра.

При передаче видео использовался пакет программ *Evalvid 2.1* и кодек *FFmpeg*. В эксперименте соотношение  $\lambda/\mu$  варьировалось в пределах от 1,0 до 2,5 с шагом 0,1.

Эталонные видеоданные были закодированы в формате *YUV420*. При кодировании исходного видео образа в формат *MPEG-4* несколько ухудшалось качество каждого видео кадра.

После сжатия эталонных видео сюжетов в формат *MPEG-4*, ухудшение качества для видеороликов было одинаковым. Первый ролик создавал битовую скорость 118 кбит/сек, второй - 748 кбит/сек.

В качестве параметра качества переданного изображения по сравнению с эталонным изображением используют величину *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*. Другим вариантом анализа является вычисление значения *MOS*. *MOS (Mean Opinion Score)*<sup>1</sup> - численная характеристика, основанная на восприятии человека. *MOS* измеряется по пятибалльной шкале. Существует общепринятое соответствие между *MOS* и *PSNR*. (см. таблицу 1).

Таблица 1. Соответствие между *MOS* и *PSNR*

<i>PSNR</i> , дБ	<b>MOS</b>
>37	5
31-37	4
25-31	3
20-25	2
<20	1

1. J. Gross, J. Klaue, H. Karl and A. Wolisz, "Cross-Layer Optimization of OFDM Transmission Systems for MPEG-4 Video Streaming", In Proc. of the 13th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation, pp. 255-272, Urbana, Illinois, USA, September 2003

На рис. 7 и 8 приведены зависимости ухудшения качества передаваемых видеороликов после кодирования их в формат MPEG-4. Видно, что ухудшение качества у них одинаковое с уровня PSNR равного 44 до 38.

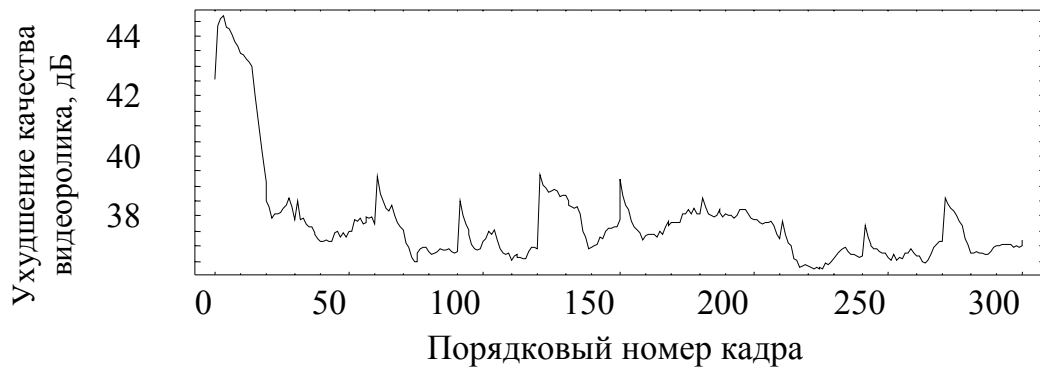


Рис. 7. Ухудшение качества исходного видеоролика № 1 при кодировании из формата *YUV420* в формат *MPEG-4*.

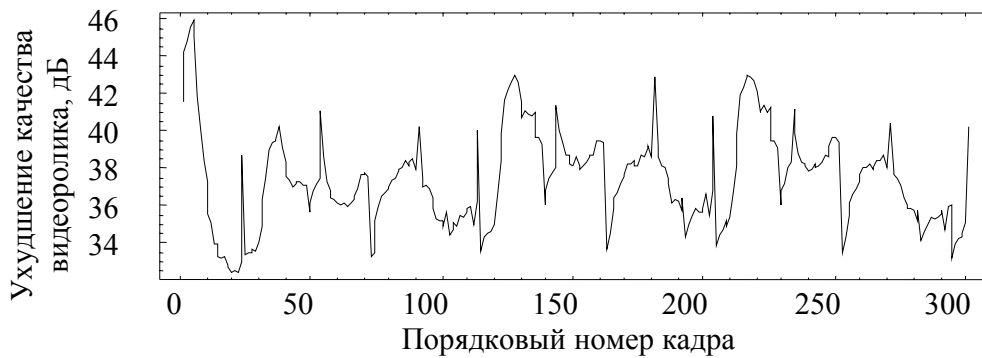


Рис. 8. Ухудшение качества исходного видеоролика №2 при кодировании из формата *YUV420* в формат *MPEG-4*

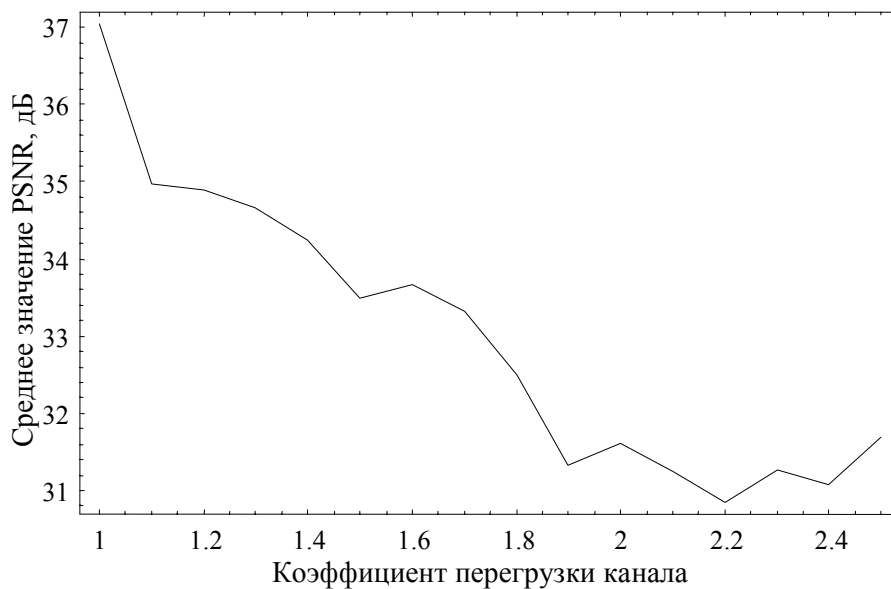


Рис. 9. Зависимость среднего (по 300 кадрам) значения PSNR от величины перегрузки  $\lambda/\mu$  для сюжета №1.

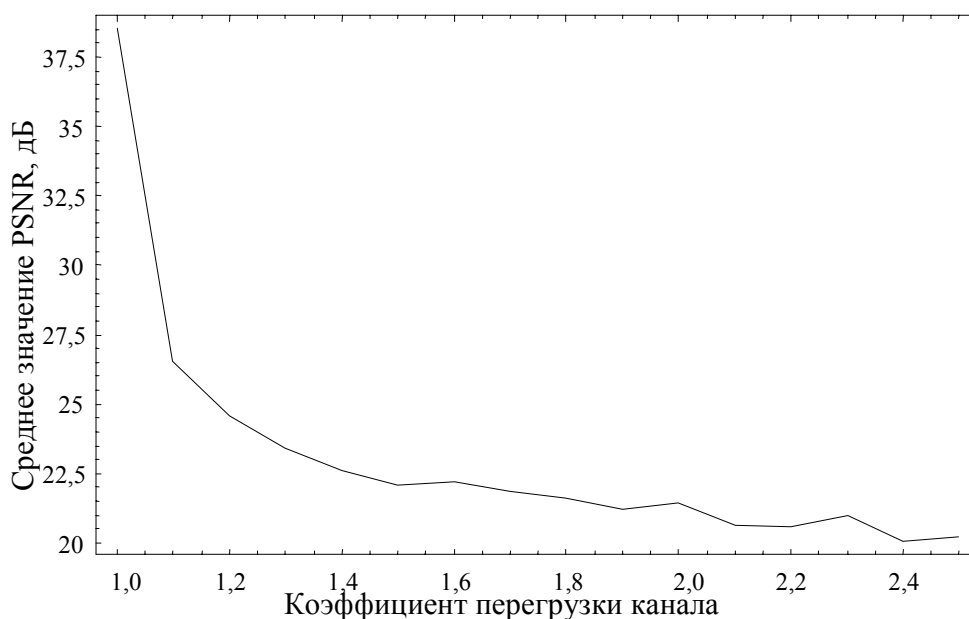


Рис. 10. Зависимость среднего (по 300 кадрам) значения PSNR от величины перегрузки  $\lambda/\mu$  для сюжета №2.

Зависимость *PSNR* на рис. 9 немонотонна. Это связано с тем, что один кадр изображения не всегда кодируется одним пакетом *RTP*. Из рис. 9 видно, что иногда возникает ситуация, при которой рост числа потерянных пакетов не приводит к ухудшению качества. Передаваемые кадры неэквивалентны по влиянию на качество изображения. Потеря *I*-кадра базового изображения оказывает длительное и весьма существенное воздействие на качество картинки, потеря же других кадров не столь существенна. Из таблицы соответствия *MOS-PSNR* (табл. 1) и рис. 9 следует, что для сюжета №1 допустимыми являются перегрузки до  $\lambda/\mu=1.6$ . В случае динамического сюжета №2 допустимая перегрузка составляет  $\lambda/\mu=1.1$ , т.е. при минимальной перегрузке наступает резкое ухудшение качества (см. рис. 10). Отсюда можно сделать вывод, что при передаче динамического видео нужно использовать какой-то метод гарантии качества обслуживания, например, протокол *MPLS-TE*<sup>1</sup>.

**В заключении** сформулирован основной результат и вывод диссертационной работы. Приведен план дальнейших исследований

**В приложении 1** приведена таблица соответствий меток DSCP их числовым значениям

**В приложении 2** приведен один из сценариев, использованный при моделировании тестового канала в среде NS-2.

1. F. L. Faucheur and W. Lai, "RFC 3564: Requirements for Support of Differentiated Services-aware MPLS Traffic Engineering," July 2003.

## Основные результаты работы

1. Выработаны рекомендации и получены аналитические оценки значений конфигурационных параметров, минимизирующих влияние осцилляции усредненной длины очереди. Определена зависимость амплитуды этих осцилляций и постоянной затухания от значений порогов WRED, от коэффициента максимальной вероятности отбрасывания пакетов, от коэффициента усреднения и от квоты полосы.
2. Разработан комплекс программ для измерения параметров качества обслуживания (полосы пропускания, RTT, дисперсии RTT, вероятности потери пакетов и некоторых корреляционных характеристик).
3. Разработан метод измерения процента потерь пакетов в удалённых сетевых сегментах для отслеживания качества предоставленных услуг.
4. Разработан алгоритм для выявления причин потерь пакетов в сетевом канале. Алгоритм основан на утверждении, что если потери сопряжены с искажениями пакетов при транспортировке, то зависимость интегральной вероятности потерь  $C_{path}$  пакетов вдоль пути будет зависеть от длины пакета  $L$ .
5. Разработаны средства для расчета величин осцилляций усредненной длины очереди и для графического отображения эволюции параметров QoS
6. В работе выполнено практическое исследование модели DiffServ в том виде, как она реализована в сетевом оборудовании на сегодняшний день. Выполнено подробное моделирование всех возможных сценариев поведения системы в диапазоне перегрузок от 1,0 до 2,5.
7. Экспериментальные расчеты совпали с предсказаниями модели, написанной в NS-2. Показано, что даже в условиях двукратной и более перегрузки виртуального канала, приоритетный поток может получить достаточную полосу, при этом ему можно гарантировать низкие значения дисперсии RTT и малую вероятность потери пакетов. Следует заметить, что это реализуемо для тех участков сети, где возможно конфигурировать маршрутизаторы (это локальные сети и сети ISP).

## Публикации по теме диссертации

1. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование влияния параметров алгоритма WRED на осцилляции длин очередей в маршрутизаторе // Информационные процессы, стр. 153-159, 2006 г., <http://www.jipr.ru/2006/153-159.pdf>
2. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование влияния параметров алгоритма WRED на качество обслуживания при передаче данных по перегруженным каналам // Информационные процессы, 2006 год, стр. 364-374
3. Гончаров А.А., Ильин А.Ю., Семенов Ю.А., Исследование влияния коэффициента перегрузки канала на качество передаваемого видео

потока // Исследовано в России, 99, 944-947, 2006  
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/099.pdf>

4. Гончаров А.А., Ильин А.Ю., Семенов Ю.А., Исследование возможностей получения гарантированного качества обслуживания при передаче мультимедиа через перегруженные каналы // Информационные процессы, 2006, стр. 310-321

5. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование зависимости вероятности потери пакета от его длины, как средство диагностика транспортного канала // Исследовано в России, 27, стр. 264-265, 2006 год, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/027.pdf>

6. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Выявление узких мест и неисправного сетевого оборудования с помощью анализа потерь пакетов // XLV Научная конференция Московского Физико-технического института, 29-30 ноября 2002года (стр.32).

7. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование зависимости вероятности потери пакета от его длины, как средство диагностика транспортного канала // Труды XLVIII Научной конференции МФТИ, 25-26 ноября 2005 года.

8. Семенов Ю.А., Гончаров А.А., Горелов А.И., Гончар А.А., Ильин А.Ю., III Международная Конференция "Интернет нового поколения - IPv6", 24-26 ноября 2004 года

9. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование возможности получения гарантированного качества обслуживания (QoS) в общедоступных сетях Интернет. // Труды XLVIII Научной конференции МФТИ, 25-26 ноября 2005 года

10. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Исследование влияния коэффициента перегрузки канала на качество передаваемого видео потока // Труды XLIX Научной конференции МФТИ, 24-25 ноября 2006 года

11. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Выявление узких мест и неисправного сетевого оборудования с помощью анализа потерь пакетов в сегментах локальной сети // Школа-семинар по компьютерной автоматизации и информатизации, ACS`2002

12. Гончаров А.А., Семенов Ю.А., Анализ влияния параметров канала и алгоритма подавления перегрузок на ухудшение качества передачи видеоизображений // «Информационно-измерительные и управляющие системы» № 3-4, 2007 г. стр. 109-112

*Гончаров Андрей Андреевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО КАЧЕСТВА  
ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ**

Подписано в печать 04.04.07 Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 70 экз. Заказ № ф-237

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Московский физико-технический институт (государственный университет) Отдел автоматизированных  
издательских систем "ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ" 141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9