

На правах рукописи

Грачев Владимир Геннадьевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА
ИНТЕРНЕТ-ПОДКЛЮЧЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы и связь)



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2006

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Симановский Е.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Семенычев В.К.

кандидат физико-математических наук, доцент

Сухов А.М.

Ведущая организация:

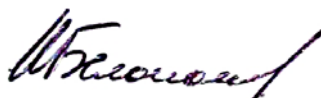
Самарский научный центр РАН (СНЦ РАН)

Защита состоится 20 октября 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.07 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени акад. С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 15 сентября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.215.07
доктор технических наук, профессор



Белоконов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сегодня трудно представить себе крупное образовательное заведение, научную организацию, фирму и т. д., которые не имели бы подключения к сети Интернет. Однако, успешное использование сети Интернет невозможно при невысоком качестве Интернет-подключения, поэтому оценка его качества является важной задачей.

Первыми начали разрабатываться методы и средства контроля качества соединения между двумя точками сети Интернет. Производилось наблюдение за значениями таких характеристик соединения (сетевых метрик), как время доставки, коэффициент потерь IP пакетов, доступность, максимальная скорость передачи данных по определенному протоколу и т.д., а также за их флуктуациями во времени.

Однако, за последнее время сеть Интернет претерпела значительный рост. Это привело к тому, что среднее число пользователей в корпоративной сети и количество ресурсов, потенциально для них интересных, многократно возросло. С учетом того, что все вышеперечисленные простейшие сетевые метрики зависят от времени и, в силу децентрализации управления, от множества других независимых подсетей, входящих в Интернет, контроль качества подключения в рамках традиционного подхода становится непростой задачей. Возникает необходимость в математическом описании происходящих в сети процессов.

Существует несколько различных подходов к описанию сетевых процессов, среди которых следует отметить аналитические модели протокола TCP, предложенные в работах M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, T. Ott, N. Cardwell и др., статистический анализ временных рядов, развитый в работах группы под руководством В.А. Васенина, модель незагруженного магистрального канала связи, разработанную С. Barakat, С. Diot и др. Однако, задачи поддержки, прогнозирования развития и оптимизации сетей, не решены полностью в рамках этих подходов, что делает актуальными исследования в данной области.

Глобальная сеть Интернет представляет собой совокупность отдельных подсетей (рассматривая сеть Интернет с различной степенью детализации, можно выделить сети континентов, стран, поставщиков услуг Интернет, организаций и их подразделений), обменивающихся друг с другом информацией, передаваемой по объединяющих их каналам передачи данных. Поэтому, сеть Интернет можно рассматривать как систему, состоящую из множества тесно взаимодействующих подсистем, и анализ происходящих в сети процессов производить в рамках системного подхода, в соответствии с которым, всегда существует функция ценности системы в виде зависимости ее эффективности от условий построения и функционирования.

Данная работа посвящена актуальной теме - разработке методов исследования качества Интернет-подключения корпоративной сети в интересах коллективного пользователя.

Цель работы. Повышение уровня обслуживания пользователей и оптимизации использования ресурсов предприятия путем разработки моделей и методов исследования качества Интернет-подключения корпоративной сети.

Задачи исследования:

- Формулировка требований к математическим моделям, определение факторов, оказывающих влияние на процессы, происходящие в сети и их характеристики.
- Создание математических моделей Интернет-подключения корпоративной сети.
- Формулировка условий качества Интернет-подключения с точки зрения "коллективного" пользователя.
- Экспериментальная проверка созданных математических моделей.
- Разработка метода текущего контроля качества Интернет-подключения.
- Разработка метода выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети.

Методы исследования. В работе используются методы математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории массового обслуживания, элементы системного подхода в прикладных исследованиях, методы многокритериальной оптимизации.

Научная новизна:

- Предложены модели Интернет-подключения корпоративной сети, которые, в отличие от уже существующих моделей, учитывают поведение пользователей в сети и особенности стека протоколов TCP/IP.
- Разработан новый метод текущего контроля качества Интернет-подключения.
- Впервые разработан метод выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети.

Достоверность результатов. Достоверность результатов обоснована корректным использованием математического аппарата; сопоставлением полученных общих результатов с частными случаями; приведенными другими авторами; экспериментальной проверкой.

Практическая ценность. Практическая ценность работы заключается в разработке методов текущего контроля качества Интернет-подключения и выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети, которые могут быть использованы, соответственно, при ее эксплуатации и для выбора оптимальной скорости подключения к Интернет.

Реализация работы. Результаты работы внедрены и используются при эксплуатации и обслуживании сети Самарского государственного аэрокосмического университета и ЗАО "Самара Телеком", что подтверждено актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты докладывались и обсуждались на международном рабочем семинаре "Цифровые сети в Среднем Поволжье" (г. Самара, 1998 год), на международных конференциях "Телематика" (г. Санкт-Петербург, 2001, 2002, 2003 года), на всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций" (г. Самара, 2005 год).

На защиту выносятся:

- Модели Интернет-подключения корпоративной сети.
- Метод текущего контроля качества Интернет-подключения.
- Метод выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (111 наименований), семи приложений. Текст диссертации изложен на 209 страницах, включая 79 страниц приложений, содержит 29 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, произведен анализ существующих подходов, которые могут быть применены к оценке качества Интернет-подключения корпоративной сети, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу особенностей Интернет-подключения корпоративной сети.

Общий анализ задачи оценки качества Интернет-подключения корпоративной сети позволил сформулировать основные требования к его моделям:

1. В силу вероятностной природы процессов, происходящих в корпоративной сети, модель должна основываться на математическом аппарате теории вероятностей и описываться числовыми характеристиками (моментами) сетевых параметров.
2. В модели должны использоваться параметры, которые могут быть измерены пассивным образом с использованием доступных на сегодняшний момент программных и аппаратных средств.
3. Модель должна связывать различные сетевые параметры со скоростью передачи данных как с основной характеристикой качества работы сети.
4. Модель должна учитывать сложившуюся структуру трафика корпоративной сети.
5. Запросы на передачу данных должны рассматриваться на уровне пользовательских сессий. Под пользовательской сессией понимается поток данных, инициированный пользователем, от одного источника (загрузка файла по протоколу FTP, html странички по протоколу HTTP и т.д.).

Интернет-подключение корпоративной сети, с учетом требований к математическим моделям, изложенным выше, показано на рис. 1.

Скорость передачи данных в Интернет-канале v является суммой скоростей всех пользовательских сессий активных в данный момент времени $v_1 \dots v_n$. Согласно требованиям к математическим моделям, числовые характеристики скорости передачи данных внешнего канала будут выражаться через различные сетевые параметры, прежде всего, через параметры пользовательских сессий, с учетом структуры трафика.

По результатам исследований, проведенных в различных сетях, в том числе и в сети Самарского государственного аэрокосмического университета, произведен *анализ структуры Интернет-трафика* и сделаны следующие выводы:

- TCP и UDP - наиболее популярные протоколы транспортного уровня;
- объем TCP трафика намного превышает объем UDP трафика;

- среди протоколов прикладного уровня наиболее популярны HTTP и FTP.

Отмечено, что наиболее популярные протоколы прикладного уровня (HTTP и FTP) работают на основе протокола транспортного уровня TCP. В протоколе TCP можно выделить два различных режима работы: “медленный старт”, характерный для передачи данных небольшого размера, и установившийся режим, в который протокол TCP переходит при передаче значительных объемов информации. Пользовательская сессия протокола HTTP – передача одного файла, обычно, небольшого по размеру (средний размер html документа – 13 кбайт). Для протокола FTP характерна передача больших объемов информации, порядка нескольких и более мегабайт. В результате, в процессе передачи данных протокол HTTP находится преимущественно в режиме “медленный старт”, а протокол FTP – в установившемся режиме протокола TCP, хотя определяющим условием для этого является, прежде всего, размер конкретной пользовательской сессии (при умеренном коэффициенте потерь пакетов).

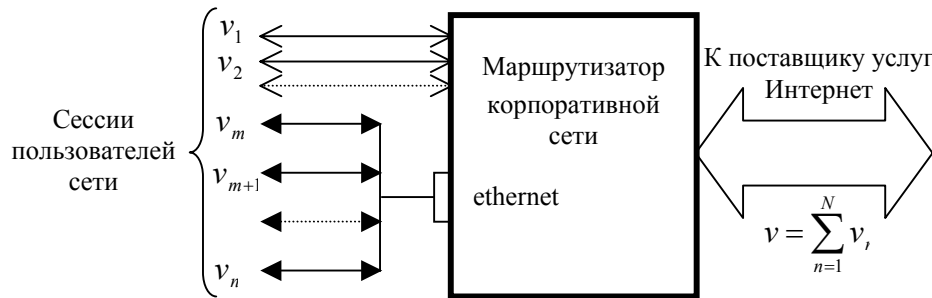


Рис. 1. Интернет-подключение корпоративной сети с учетом требований к математическим моделям.

Общий *поток запросов на открытие сессий* от корпоративной сети складывается из большого числа потоков запросов отдельных пользователей. При условии, что поток запросов каждого пользователя является ординарным, стационарным и потоки отдельных пользователей вносят приблизительно равный малый вклад в общий поток запросов

сов, то, согласно теореме Хинчина, даже в случае, если моменты поступления запросов одного пользователя зависят друг от друга, можно утверждать, что суммарный поток будет простейшим или стационарным пуассоновским.

Суммарный поток запросов на открытие сессий от пользователей сети не будет стационарным на протяжении всего времени - активность пользователей сильно различается в зависимости от времени суток, дня недели и т.д. Но, разбивая все время наблюдения на небольшие промежутки, можно предположить, что внутри каждого такого промежутка средняя интенсивность поступления запросов от пользователей является величиной постоянной и, соответственно, поток - стационарным. Действительно, исследования, проведенные в реальных сетях, подтверждают правоту данного предположения.

В качестве *параметров для описания пользовательских сессий* выбраны размер данных, передаваемых за сессию (длина сессии, измеряется в байтах) L_n , и время обслуживания сессии (длительность сессии, измеряется в секундах) W_n . Данные параметры сессий могут быть получены с сетевых устройств, например, по протоколу Cisco NetFlow.

По зависимостям, возникающим между значениями параметров пользовательских сессий, выделено три режима работы: незагруженный, перегрузка в корпоративной сети, перегрузка в сети поставщика услуг Интернет (ПУИ).

Так как пользователи работают независимо друг от друга и их интересы не совпадают, то, очевидно, что длины отдельных пользовательских сессий внутри последовательности L_n независимы для любого режима работы сети.

В режиме *незагруженной корпоративной сети* длительности сессий W_n независимы друг от друга. Также для данного режима работы сети характерна слабая зависимость между длиной сессии L_n и соответствующей ей длительностью сессии W_n - данные большого размера могут быть переданы за малое время, и, наоборот, малого размера - за большое время. Конечно, полная независимость между L_n и W_n невозможна в виду ограниченной скорости каналов передачи данных, так что для длинных сессий зависимость между ними будет больше, для коротких сессий зависимость будет выражена слабее.

В режиме *перегрузки в корпоративной сети* в полном времени доставки IP пакетов сессий преобладает время их нахождения в буфере граничного маршрутизатора сети. Длительность сессии W_n зависит от времени доставки IP пакетов сессии (в данном случае, примерно одинаковом для всех сессий) и числа пакетов, на которое разбивается вся сессия при передаче данных, которое пропорционально длине сессии L_n . Таким образом, длина L_n и соответствующая ей длительность

W_n сессии оказываются зависимыми величинами. IP пакеты разных пользовательских сессий находятся в одном буфере маршрутизатора и, очевидно, IP пакеты одной сессии влияют на время нахождения в буфере IP пакетов других сессий. Длительности сессий W_n также оказываются зависимыми величинами.

В режиме *перегрузки в сети поставщика услуг Интернет* длительности сессий W_n оказываются независимыми друг от друга, за счет того, что в сети ПУИ, вносящей наибольший вклад в длительности сессий, перемешивается трафик от большого числа клиентов этой компании и влияние IP пакетов сессий данной организации друг на друга становится ничтожным. Длина L_n и длительность сессии W_n оказываются зависимыми за счет существования одного и того же участка передачи, вносящего наибольший вклад в во время доставки IP пакетов пользовательских сессий.

Экспериментальные исследования, проведенные в сети Самарского государственного аэрокосмического университета, подтвердили высказанные выше предположения.

Во второй главе разработаны модели Интернет-подключения корпоративной сети.

Пользовательские сессии (v_1, v_2, \dots, v_n , где v_n – скорость n-й сессии) поступают на маршрутизатор и мультиплексируются во внешнем канале (рис. 2).

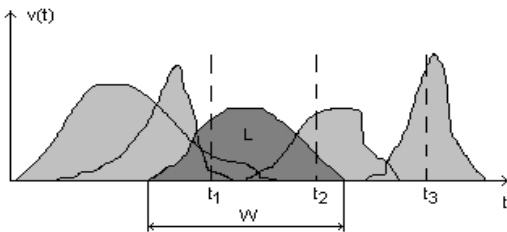


Рис. 2 Мультиплексирование пользовательских сессий.

Следует заметить, что данные передаются в виде IP пакетов с физической скоростью канала связи. На рис. 2 показан усредненные графики скоростей сессий. За интервал усреднения принимается промежуток времени, за который пакет передается от источника к получателю и обратно *RTT* (Round Trip Time). Везде под термином «скорость передачи данных» подразумевается усредненная таким образом величина.

Также, следует учесть, что данные всегда передаются в обоих направлениях. Но так как трафик организации, обычно, несимметричен, то достаточно исследовать лишь наиболее загруженное направление.

В любой момент времени, скорость внешнего канала сети является суммой случайного числа мгновенных скоростей отдельных сессий (моменты времени t_1, t_2, t_3 на рис. 2). С учетом того, что запросы пользователей образуют стационарный пуассоновский поток и скорости отдельных пользовательских сессий распределены одинаково можно записать:

$$v = \sum_{n=1}^N v_n, \tag{1}$$

где v – скорость передачи данных в Интернет-канале,

v_n – скорость n-й пользовательской сессии,

N – количество пользовательских сессий, обслуживающихся одновременно.

Среднее значение и дисперсия случайной величины v :

$$M[v] = M\left[\sum_{n=1}^N v_n\right] = M[N]M[v_n], \tag{2}$$

$$D[v] = D\left[\sum_{n=1}^N v_n\right] = M[v_n]^2 D[N] + M[N]D[v_n] + rD[v_n](M[N^2] - M[N]), \tag{3}$$

где r – коэффициент корреляции между случайными величинами v_n .

Выражения (2) и (3) верны в том случае, когда случайные величины N и v_n независимы друг от друга, что приводит к требованию независимости времен обслуживания пользовательских сессий.

Случайная величина N соответствует количеству запросов в системе массового обслуживания $M/G/\infty$. При условии независимости времен обслуживания сессий:

$$M[N] = \lambda \bar{W}, \quad D[N] = \lambda \bar{W}, \tag{4}$$

где λ – интенсивность входного пуассоновского потока,

\bar{W} – среднее время обслуживания сессии.

Перепишем выражения (2) и (3) для **режима незагруженной корпоративной сети**, используя выражения (4), и, учитывая, что в данном режиме $r = 0$:

$$M[v] = \lambda \bar{W} M[v_n], \quad (5)$$

$$D[v] = M[v_n]^2 \lambda \bar{W} + \lambda \bar{W} D[v_n] = M[v_n]^2 \lambda \bar{W} + \lambda \bar{W} (M[v_n^2] - M[v_n]^2) = \lambda \bar{W} M[v_n^2]. \quad (6)$$

В работе показано, что среднее значение скорости сессии $M[v_n]$ и ее квадрата $M[v_n^2]$ можно найти, усредняя их значения в два этапа: сначала по форме импульса скорости сессии, а затем по совокупности всех сессий в потоке заявок. В таком случае:

$$M[v_n] = \sum_i \sum_j \bar{v}_{s_{nij}} P_{обс_{ni}} P_{обс_{nj}} = \sum_i \sum_j \frac{L_{ni}}{W_{nj}} P_{обс_{ni}} P_{обс_{nj}} = \sum_i \sum_j \frac{L_{ni}}{W_{nj}} p_{ni} p_{nj} \frac{W_{nj}}{W} = \frac{1}{W} \sum_i L_{ni} p_{ni} \sum_j p_{nj} = \frac{L}{W}, \quad (7)$$

$$M[v_n^2] = \sum_i \sum_j \bar{v}_{s_{nij}}^2 P_{обс_{ni}} P_{обс_{nj}} = \frac{1}{W} \sum_i \sum_j \bar{v}_{s_{nij}}^2 W_{nj} p_{ni} p_{nj} = \frac{1}{W} M[v_{s_n}^2 W_n], \quad (8)$$

где $\bar{v}_{s_{nij}}$ - усредненная по форме скорость пользовательской сессии длиной L_{ni}

и длительностью W_{nj} ,

$\bar{v}_{s_{ij}}^2$ - усредненный по форме квадрат скорости пользовательской сессии длиной L_{ni}

и длительностью W_{nj} ,

$P_{обс_{ni}}$ - вероятность нахождения на обслуживании сессии длиной L_{ni} ,

$P_{обс_{nj}}$ - вероятность нахождения на обслуживании сессии длительностью W_{nj} ,

p_{ni} - вероятность появления сессии длиной L_{ni} в потоке заявок,

p_{nj} - вероятность появления сессии длительностью W_{nj} в потоке заявок.

С учетом того, что среднее значение квадрата скорости сессии зависит от формы импульса скорости сессии, выражения (5) и (6) для наиболее распространенных типов сессий примут вид:

$$M[v] = \lambda_{UDP} \bar{L}_{UDP} + \lambda_{FTP} \bar{L}_{FTP} + \lambda_{HTTP} \bar{L}_{HTTP} = \lambda \bar{L}, \quad (9)$$

$$D[v] = \lambda_{UDP} M_{UDP} [v_n^2(L_n, W_n) W_n] + \lambda_{FTP} M_{FTP} [v_n^2(L_n, W_n) W_n] + \lambda_{HTTP} M_{HTTP} [v_n^2(L_n, W_n) W_n]. \quad (10)$$

Рассмотрим наиболее распространенные типы пользовательских сессий.

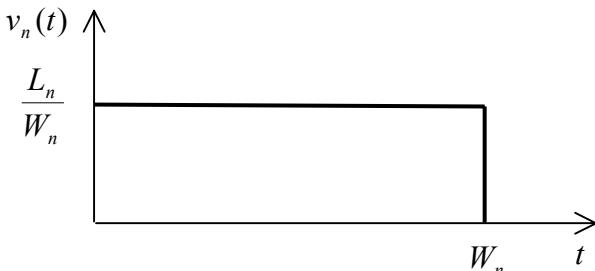


Рис. 3. Скорость передачи данных сессии, протокол UDP.

UDP сессия. График импульса скорости UDP сессии $v_n(t)$ показан на рис. 3. Усредненное по форме значение квадрата скорости сессии $\bar{v}_{s_n}^2$ находится как отношение площади под кривой квадрата импульса скорости сессии к ее длительности W_n . Для UDP сессии, непосредственно из графика, получаем:

$$\bar{v}_{s_n}^2 = \frac{L_n^2}{W_n^2}. \quad (11)$$

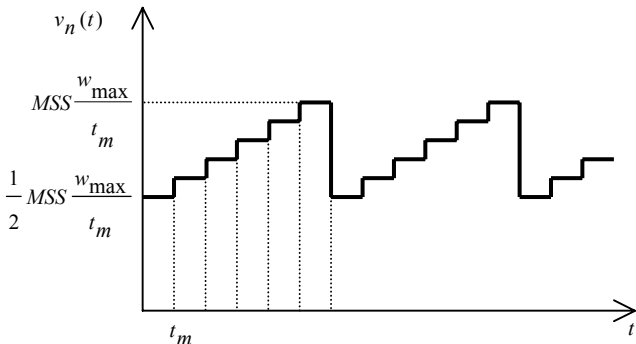


Рис. 4. Скорость передачи данных сессии, протокол FTP, $b = 1$.

FTP сессия. Для протокола прикладного уровня FTP характерна передача больших объемов информации в "установившемся" режиме протокола транспортного уровня TCP. В этом режиме объем данных, передаваемых за один интервал $t_m = RTT$, увеличивается линейно с коэффициентом пропорциональности равным MSS/b (MSS - максимальный размер сегмента данных, типичные значения 536-1460 байт; b - коэффициент, учитывающий эффект задержки подтверждения, зависит от реализации протокола TCP). В случае получения дублирующих подтверждений, считается, что перегрузка в сети носит временный характер и запускается механизм "быстрой повторной передачи", состоящий в том, что TCP уменьшает

объем передаваемых данных в два раза, с $MSS \frac{w_{max}}{t_m}$ до $\frac{1}{2} MSS \frac{w_{max}}{t_m}$ (w_{max} - максимальный размер окна данных). Обычно, для протоколов типа FTP, эффектом перехода в режим «медленного старта» пренебрегают, так как вероятность этого события невелика и время нахождения в этом режиме значительно меньше общего времени передачи.

На рис. 4 показан график импульса скорости FTP сессии. В работе показано, что для FTP сессий выполняется соотношение:

$$\overline{v_{s_n}^2} = \frac{28}{27} \frac{L_n^2}{W_n^2}. \quad (12)$$

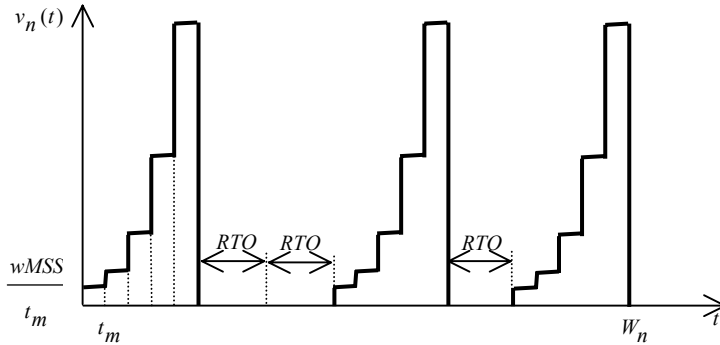


Рис. 5. Скорость передачи данных сессии, протокол HTTP.

HTTP сессия. Длина пользовательской сессии, передаваемой по протоколу HTTP, не превышает нескольких десятков килобайт. В результате, “установившийся” режим протокола TCP не достигается, и данные передаются в режиме “медленный старт”. В этом режиме TCP начинает передачу с некоторого минимального размера данных $wMSS$ и увеличивает его на один MSS в ответ на подтверждение приема каждого сегмента. То есть, размер передаваемых данных является геометрической прогрессией со знаменателем прогрессии равным $r = (1 + 1/b)$. При потере сегмента,

размер окна устанавливается в свое начальное значение $wMSS$ и процесс передачи начинается заново (см. рис. 5).

Для пользовательских сессий размером менее 25 кбайт и при коэффициенте потерь пакетов не превосходящем 5%, количество фаз RTO (время ожидания после потери пакета) меньше единицы, то есть, данные передаются за одну фазу. В этом случае:

$$\overline{v_{s_n}^2} = \frac{C}{\ln r} \frac{r-1}{r+1} \frac{L_n^2}{W_n^2}, \quad (13)$$

$$\text{где } C = \ln\left(\frac{\bar{L}(r-1)}{wMSS} + 1\right) \frac{\bar{L}(r-1) + 2wMSS}{\bar{L}(r-1)}. \quad (14)$$

Дисперсия скорости внешнего канала находится объединением (10), (11), (12) и (13):

$$D[v] = \lambda_{UDP} M_{UDP} [L_n^2 / W_n] + \frac{28}{27} \lambda_{FTP} M_{FTP} [L_n^2 / W_n] + \frac{C}{\ln r} \frac{r-1}{r+1} \lambda_{HTTP} M_{HTTP} [L_n^2 / W_n]. \quad (15)$$

Применяя теорему о математическом ожидании произведения двух случайных величин, выражая среднее значение L_n^2 через среднее значение и дисперсию L_n и учитывая, что для коротких пользовательских сессий величины L_n и W_n независимы друг от друга, (15) можно записать в виде:

$$D[v] = \lambda_{UDP} \frac{\bar{L}_{UDP}^2 + D[L_{UDP}]}{\bar{W}_{HUDP}} + \frac{28}{27} \lambda_{FTP} \left(\frac{\bar{L}_{FTP}^2 + D[L_{FTP}]}{\bar{W}_{HFTP}} + K_{FTP} \left[\frac{L_n^2}{W_n} \right] \right) + \frac{C}{\ln r} \frac{r-1}{r+1} \lambda_{HTTP} \frac{\bar{L}_{HTTP}^2 + D[L_{HTTP}]}{\bar{W}_{HHTTP}}, \quad (16)$$

где \bar{W}_H - среднее гармоническое времени обслуживания сессии.

В режиме **перегрузки в сети поставщика услуг Интернет** длительности пользовательских сессий W_n независимы друг от друга, а соответствующие длина L_n и длительность W_n зависимы, в том числе и для коротких сессий.

Аналогично режиму незагруженной корпоративной сети для двух первых моментов скорости передачи данных получаем следующие выражения:

$$M[v] = \lambda \bar{L},$$

$$D[v] = \lambda_{UDP} \left(\frac{\bar{L}_{UDP}^2 + D[L_{UDP}]}{\bar{W}_{HUDP}} + K_{UDP} \left[\frac{L_n^2}{W_n} \right] \right) + \frac{28}{27} \lambda_{FTP} \left(\frac{\bar{L}_{FTP}^2 + D[L_{FTP}]}{\bar{W}_{HFTP}} + K_{FTP} \left[\frac{L_n^2}{W_n} \right] \right) +$$

$$\frac{C}{\ln r} \frac{r-1}{r+1} \lambda_{\text{HTTP}} \left(\frac{\bar{L}_{\text{HTTP}}^2 + D[L_{\text{HTTP}}]}{\bar{W}_{\text{HTTP}}} + K_{\text{HTTP}} \left[\frac{L_n^2}{W_n} \right] \right). \quad (17)$$

При одних и тех же значениях сетевых параметров, средние значения скорости передачи данных внешнего канала в режимах незагруженной сети и перегрузки в сети ПУИ равны, а дисперсия меньше для режима перегрузки в сети ПУИ (за счет существования зависимости между длиной и длительностью пользовательских сессий).

Режим *перегрузки в корпоративной сети* характеризуется следующими условиями:

- Длительности сессий W_n зависимы друг от друга.
- Соответствующие длина L_n и длительность сессии W_n зависимы как для длинных, так и для коротких сессий.
- За счет зависимости длительностей сессий W_n , скорости пользовательских сессий также v_n зависимы друг от друга, а распределение случайной величины N не является пуассоновским.
- Случайные величины N и v_n зависимы, формулы (2) и (3) не применимы.

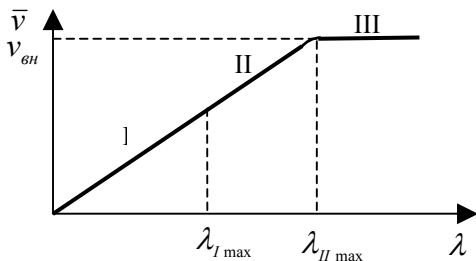


Рис. 6. Средняя скорость передачи данных внешнего канала.

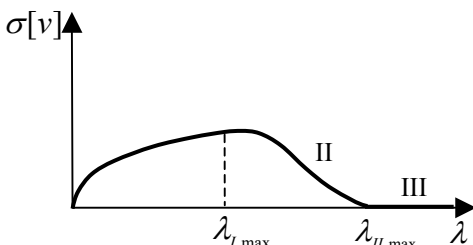


Рис. 7. Среднее квадратическое отклонение скорости передачи данных внешнего канала.

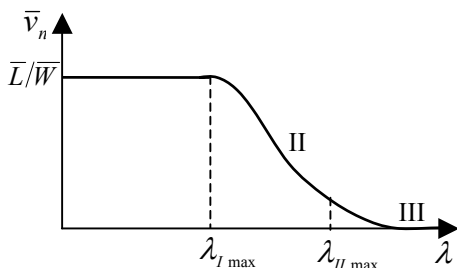


Рис. 8. Средняя скорость пользовательской сессии.

зависимости между длиной сессии L_n и временем ее обслуживания W_n , а также зависимости между скоростями отдельных сессий, среднее квадратическое отклонение начинает уменьшаться и в состоянии полной перегрузки сети (участок III) стремится к нулю.

Средняя скорость пользовательской сессии (рис. 8) в незагруженном состоянии сети постоянна и полностью определяется интересами пользователей и точкой подключения (сетью ПУИ). В состоянии перегрузки (участок II) скорость сессии зависит от общего числа сессий, находящихся на обслуживании одновременно, и уменьшается с увеличением интенсивности входного потока

В работе доказано, что при одних и тех же значениях сетевых параметров, среднее значение квадрата скорости передачи данных Интернет-канала в незагруженном режиме больше, чем в режиме перегрузки. Таким образом, учитывая, что средняя скорость передачи в обоих режимах работы сети одинакова, можно заключить, что и дисперсия скорости передачи данных в незагруженном режиме также превышает дисперсию скорости передачи в режиме перегрузки. Когда физическая скорость внешнего канала $v_{\text{вн}}$ стремится к средней скорости передачи данных \bar{v} , среднее значение квадрата скорости передачи стремится к квадрату среднего значения скорости, следовательно, дисперсия скорости передачи стремится к нулю.

На *графиках* изменения моментов скорости внешнего канала и средней скорости пользовательской сессии, построенных в зависимости от интенсивности потока поступления заявок на обслуживание λ , можно выделить три участка, соответствующих незагруженной сети (I), режиму перегрузки (II), и полностью перегруженному состоянию сети (III).

На участках I и II средняя скорость внешнего канала (рис. 6) изменяется линейно с коэффициентом пропорциональности \bar{L} . В состоянии полной перегрузки (III) средняя скорость равна физической скорости внешнего канала $v_{\text{вн}}$. Для данного состояния сети характерен большой коэффициент потерь пакетов, в результате чего многие пользовательские сессии оказываются не обслуживаемыми.

Среднее квадратическое отклонение скорости внешнего канала (рис. 7) на участке I возрастает как $\sqrt{\lambda}$. В состоянии перегрузки (участок II) в результате увеличения среднего времени обслуживания сессии \bar{W} , появления

запросов. В состоянии полной перегрузки, участок III, скорость пользовательской сессии падает до нуля.

Приведенные выше результаты позволяют сформулировать и использовать в практической работе следующие *условия качества Интернет-подключения корпоративной сети* с точки зрения "коллективного" пользователя:

1. *Средняя скорость пользовательской сессии должна быть больше минимального значения, необходимого для успешной деятельности организации.*

Средняя скорость сессии учитывает интересы всех пользователей сети, поэтому может использоваться в качестве «интегральной» метрики, определяющей качество работы сети организации в целом.

2. *Корпоративная сеть должна находиться в незагруженном состоянии.*

Выполнение этого условия гарантирует то, что: а) средняя скорость пользовательской сессии достигает максимального значения, которое можно получить при подключении к данному ПУИ; б) средняя скорость пользовательской сессии не зависит от числа пользователей в корпоративной сети или сети ПУИ, работающих в данный момент времени.

В третьей главе произведено экспериментальное обоснование разработанных математических моделей Интернет-подключения корпоративной сети.

В ходе эксперимента исследовался входящий трафик Самарского государственного аэрокосмического университета. Эксперимент производился в течение одних суток, в период с 20:00 11.11.2003 по 20:00 12.11.2003. Основанием, послужившим для выбора такого интервала наблюдения, был тот факт, что процессы, происходящие в сети, имеют ярко выраженную периодичность с периодом в одни сутки.

В ходе эксперимента сравнивались значения числовых характеристик скорости передачи данных Интернет-канала, рассчитанных по экспериментальным данным ("экспериментальные") и по формулам, полученным в данной работе ("теоретические").

На рис. 9 показаны экспериментальные значения скорости внешнего канала и теоретические оценки границы ее изменения: $v = \bar{v} \pm 3\sigma$.



Рис. 9. Границы изменения скорости передачи данных.

Относительная ошибка теоретического среднего значения скорости передачи данных не превышает 5%. Относительная ошибка теоретического значения среднеквадратического отклонения на интервалах наблюдения, на которых модель применима, в незагруженном состоянии сети не превышает 10%.

В целом, экспериментальная проверка математических моделей Интернет-подключения корпоративной сети, предложенных в данной работе, показывает, что они адекватно представляют процессы, происходящие в сети при средней и высокой нагрузках. В период слабой загрузки сети, за счет того, что поведение сети определяется небольшим количеством пользователей, обращающихся к небольшому количеству ресурсов, предложенный подход не применим.

Разработанные модели послужили основой для методов исследования качества Интернет-подключения корпоративной сети, представленных в **четвертой главе**.

Метод текущего контроля качества Интернет-подключения дает ответы на следующие вопросы, возникающие во время эксплуатации Интернет-подключения корпоративной сети:

- Является ли недостаточная скорость передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети фактором, ухудшающим качество обслуживания пользователей?
- Если скорость Интернет-канала слишком мала для потребностей организации, то насколько необходимо ее увеличить, чтобы обеспечить наилучшее качество обслуживания пользователей сети, доступное при подключении к данному ПУИ?
- Как отразится на качестве обслуживания пользователей изменение различных сетевых параметров?

Схема метода показана на рис. 10.

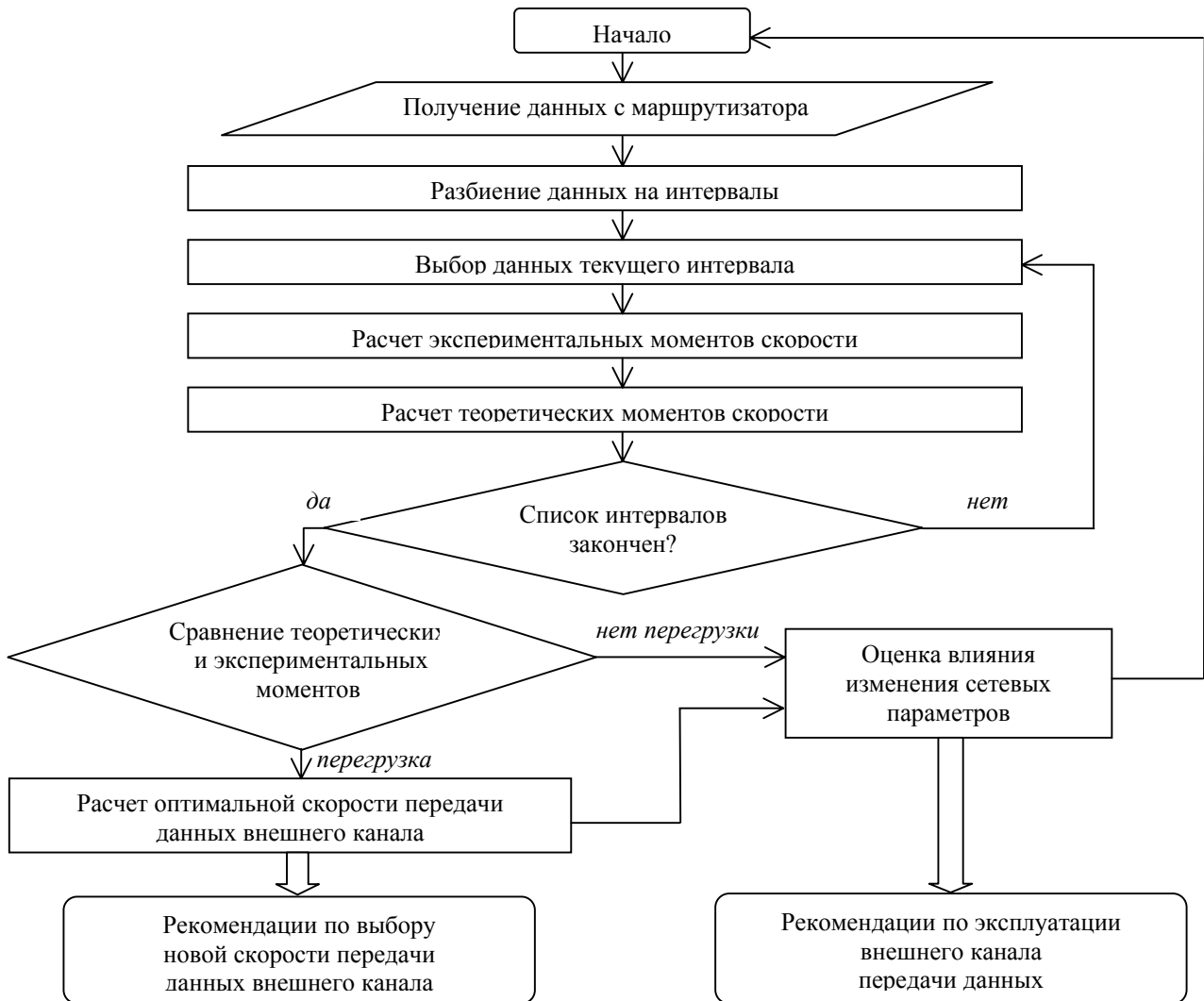


Рис. 10. Схема метода текущего контроля качества Интернет-подключения корпоративной сети

Расчет теоретических моментов скорости внешнего канала производится на основе экспериментальных значений сетевых величин, в предположении, что сеть находится в незагруженном состоянии, см. соотношения (9) и (15).

При сравнении экспериментальных и теоретических моментов скорости внешнего канала необходимо учитывать, что если теоретическая дисперсия скорости внешнего канала $D[v]$ оказалась больше дисперсии скорости внешнего канала, рассчитанной непосредственно по экспериментальным данным, значит имеет место перегрузка в корпоративной сети или сети ПУИ. Для режимов перегрузки также характерно возникновение значительной корреляцией между соответствующими значениями длины и длительности пользовательской сессии, в том числе и для коротких сессий.

Для режима перегрузки в корпоративной сети, кроме того, характерно возникновение зависимости между временами обслуживания сессий, которую можно обнаружить по значительной автокорреляции в последовательности данной случайной величины.

Расчет оптимальной скорости передачи данных внешнего канала производится по методу, изложенному далее. В качестве значений величин W , $M[L_n^2/W_n]$ должны использоваться значения, соответствующие незагруженной сети, в качестве значения λ принимается наибольшая возможная интенсивность входного потока запросов.

Метод выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети. Задача оценки скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети возникает, когда организация подключается к Интернет и необходимо выбрать ПУИ и оценить скорость канала, которую необходимо у него закупить. При этом качество Интернет-подключения должно соответствовать требованиям данной организации, а затраты на подключение не должны превосходить сумм, заложенных на эти цели в ее бюджете. Ошибки в выборе скорости Интернет-подключения могут привести к значительному повышению затрат на Интернет-подключение.

Схема метода выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети приведена на рис. 11.

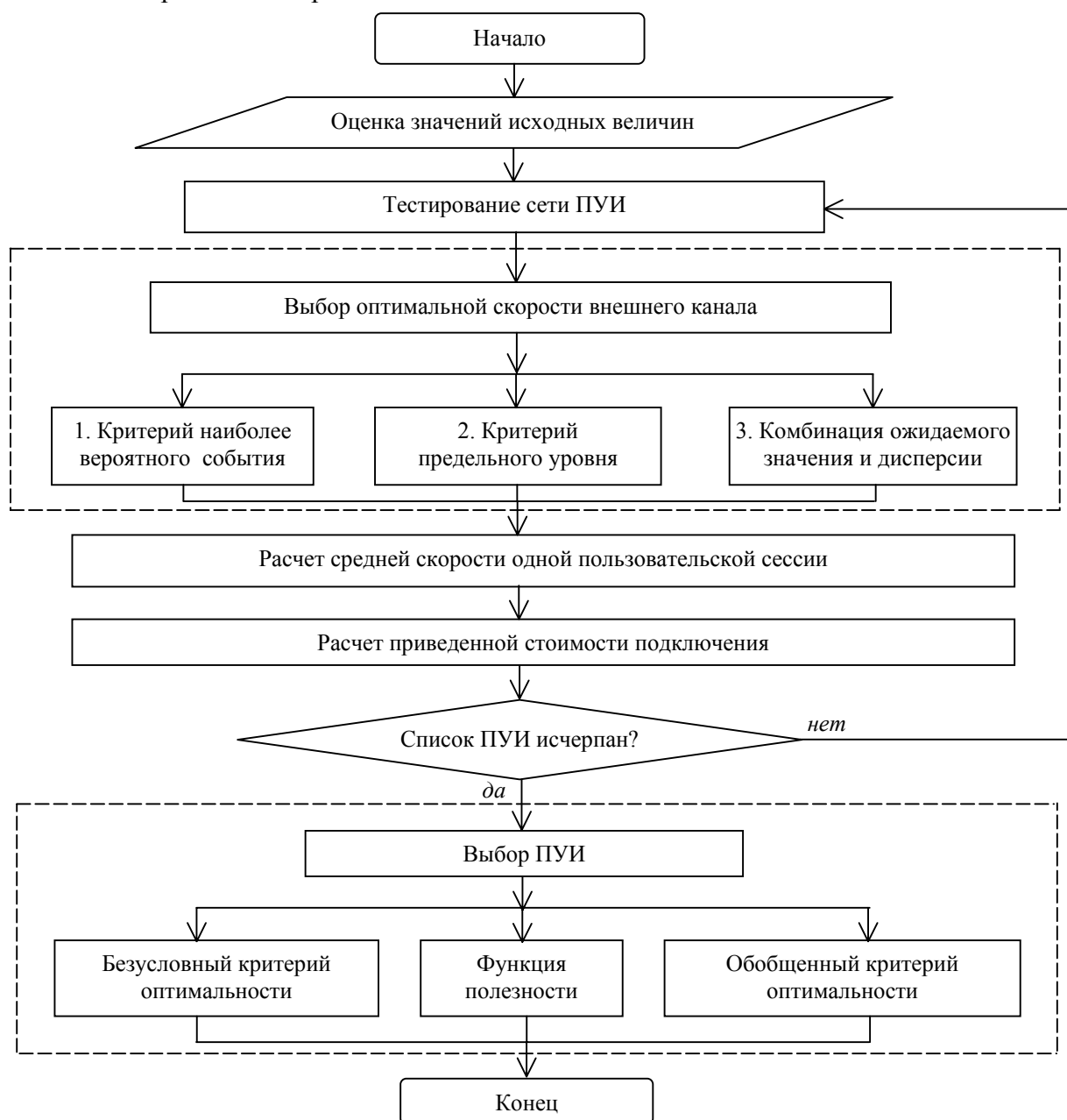


Рис. 11. Схема метода выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети

Исходными параметрами для метода являются минимальная требуемая средняя скорость одной пользовательской сессии \bar{v}_n (байт/с) и оценки следующих величин:

- λ_{UDP} , λ_{FTP} , λ_{HTTP} - интенсивности поступления запросов на открытие сессий, 1/с;

- $\bar{L}_{UDP}, \bar{L}_{FTP}, \bar{L}_{HTTP}$ - средние длины сессии, байт;
- $D[L_{UDP}], D[L_{FTP}], D[L_{HTTP}]$ - дисперсии длины сессии;
- $r_{FTP} [L_n^2 / W_n]$ - коэффициент корреляции для протокола FTP;
- $\sigma_{FTP} [L_n^2], \sigma_{FTP} [1/W_n]$ - средние квадратические отклонения для протокола FTP;
- $\bar{W}_{H UDP}, \bar{W}_{H FTP}, \bar{W}_{H HTTP}$ - средние гармонические времена обслуживания сессии.

Оценки величин $\lambda_{UDP}, \lambda_{FTP}, \lambda_{HTTP}, \bar{L}_{UDP}, \bar{L}_{FTP}, \bar{L}_{HTTP}, D[L_{UDP}], D[L_{FTP}], D[L_{HTTP}], \sigma_{FTP} [L_n^2]$ могут быть получены методом экспертных оценок с учетом “класса” корпоративной сети. Несколько сетей можно отнести к одному классу, если эти сети имеют сходную структуру трафика, то есть похожее распределение трафика по протоколам и запрашиваемым документам. В этом случае значения исходных параметров, будут подобны (с поправкой на размер сети) значениям тех же параметров сети другой организации, уже имеющей подключение к сети Интернет и относящейся к тому же “классу”. Можно выделить следующие классы: гуманитарный вуз, технический вуз, банк, коммерческая организация определенного профиля, организация, предоставляющая доступ в Интернет пользователям, работающим из дома по телефонной линии т.д.

Дать точные оценки описанных выше величин обычно не представляется возможным, так как они носят вероятностный характер. Поэтому эти оценки следует рассматривать как случайные величины и из опыта или методом экспертных оценок задавать их закон распределения: непрерывный, с помощью функции плотности распределения или дискретный, с помощью ряда распределения. Вероятности, фигурирующие в этих законах распределения, могут быть интерпретированы как субъективные вероятности. В случае, когда нет уверенности какой конкретный вид распределения будут иметь исходные величины, могут быть заданы несколько возможных распределений для каждой из них, совместно с вероятностью реализации каждого вида распределения. Все эти меры по подготовке исходных данных позволят получить более точную оценку искомой величины.

Оценки величин $\bar{W}_{H UDP}, \bar{W}_{H FTP}, \bar{W}_{H HTTP}, r_{FTP} [L_n^2 / W_n], \sigma_{FTP} [1/W_n]$ получают тестированием сети ПУИ, причем для тестирования должен использоваться набор сетевых ресурсов, характерный для данного класса организации. Они также могут быть заданы как непрерывные или дискретные случайные величины.

Выбор оптимальной скорости передачи данных внешнего канала производится по одному из трех следующих критериев.

1. Критерий наиболее вероятного события.

$$v_{вн} = M[v] + k_1 \sigma[v],$$

$$\text{где } M[v] = \lambda_{UDP} \bar{L}_{UDP} + \lambda_{FTP} \bar{L}_{FTP} + \lambda_{HTTP} \bar{L}_{HTTP} = \lambda \bar{L},$$

$$\sigma^2[v] = \lambda_{UDP} \frac{\bar{L}_{UDP}^2 + D[L_{UDP}]}{\bar{W}_{H UDP}} + \frac{28}{27} \lambda_{FTP} \left(\frac{\bar{L}_{FTP}^2 + D[L_{FTP}]}{\bar{W}_{H FTP}} + r_{FTP} \left[\frac{L_n^2}{W_n} \right] \sigma_{FTP} [L_n^2] \sigma_{FTP} [1/W_n] \right) + \frac{C}{\ln r} \frac{r-1}{r+1} \lambda_{HTTP} \frac{\bar{L}_{HTTP}^2 + D[L_{HTTP}]}{\bar{W}_{H HTTP}},$$

k_1 - коэффициент, зависящий от вида распределения скорости в Интернет-канале и требуемой вероятности попадания скорости в интервал $M[v] \pm k\sigma[v]$. В случае произвольного вида распределения можно положить $k = 3$, тогда, согласно неравенству Чебышева, вероятность попадания в заданный интервал $p \approx 0.89$, соответственно, вероятность того, что скорость во внешнем канале превысит величину $M[v] + 3\sigma[v]$ не больше $\tilde{p} = 1 - p \approx 0.11$, а когда распределение скорости во внешнем канале симметрично относительно ее математического ожидания $\tilde{p} = (1 - p)/2 \approx 0.055$. В случае нормального распределения $\Phi(k) = (1 - 2\tilde{p})/2$, где $\Phi(x)$ - функция Лапласа.

В качестве значений исходных величин для расчета данного критерия берутся значения с наибольшей вероятностью реализации.

Данный критерий лучше всего подходит для ситуации, когда вероятность одной из реализаций исходных величин значительно превышает все остальные.

2. Критерий предельного уровня.

Оценка скорости внешнего канала вычисляется с помощью того же выражения, как и для критерия наиболее вероятного события, но в качестве значений исходных величин

берутся их максимальные значения, для которых вероятность совместной реализации больше нуля.

Данный критерий может использоваться в случае, когда необходимо обеспечить качественное Интернет-подключение при предельной загрузке.

3. Комбинация ожидаемого значения и дисперсии.

При комбинации ожидаемого значения и дисперсии можно учесть возможное отклонение величины рассчитываемой скорости передачи данных от ее среднего значения вследствие вероятностной природы исходных данных. Математически данный критерий выражается с помощью следующего соотношения:

$$v_{\text{вн}3} = M[v_{\text{вн}}] + k_3 \sigma[v_{\text{вн}}], \text{ где}$$

$v_{\text{вн}3}$ - скорость Интернет-канала по критерию ожидаемого значения и дисперсии;

$v_{\text{вн}} = M[v] + k\sigma[v]$ - расчетное выражение для скорости Интернет-канала;

$M[v]$, $\sigma[v]$ - среднее значение и среднеквадратическое отклонение скорости во внешнем канале, см. критерий наиболее вероятного события;

k - постоянный коэффициент, см. критерий наиболее вероятного события;

$M[v_{\text{вн}}]$, $\sigma[v_{\text{вн}}]$ - среднее значение и среднеквадратическое отклонение расчетной скорости внешнего канала, определяемые как числовые характеристики функции нескольких независимых случайных аргументов;

k_3 - постоянный коэффициент, "уровень не склонности к риску" (чем большее значение организация придает риску перегрузки Интернет-канала за счет дисперсии его расчетной скорости, вызванной вероятностной природой исходных данных, тем данный коэффициент должен иметь большее значение).

Приведенная стоимость подключения в месяц к данному ПУИ складывается из платы за подключение $E_{\text{подкл.}}$, приведенной ко всему времени эксплуатации внешнего канала T (в месяцах), и абонентской платы за подключение в месяц $E_{\text{абон.}}$: $E = E_{\text{подкл.}} / T + E_{\text{абон.}}$.

Критериями для выбора ПУИ и скорости внешнего канала являются значения средней скорости одной пользовательской сессии \bar{v}_n и приведенная стоимость подключения в месяц E . Данные критерии являются взаимно конкурирующими: при увеличении средней скорости пользовательской сессии качество обслуживания пользователей сети улучшается, но при этом увеличивается расчетное значение скорости внешнего канала $v_{\text{вн}}$ и, как следствие, возрастает приведенная стоимость подключения.

В рассматриваемой задаче каждому ПУИ соответствует точка $(\bar{v}_n^{(i)}, E^{(i)})$ в двумерном пространстве, см. рис. 12 ($\bar{v}_{n \text{ мин}}$ - минимальная допустимая скорость одной пользовательской сессии и $E_{\text{ макс}}$ - максимальная приведенная стоимость подключения к сети Интернет).

На практике, система из двух критериев может быть расширена любыми другими критериями, актуальными для данной организации. Также, задача выбора скорости передачи данных Интернет-подключения может быть частью более крупной задачи проектирования мультисервисной распределенной сети организации.

Оптимальное решение может принадлежать только области компромиссов (решения из области компромиссов на рисунке 12 обведены кружочками).

В общем случае, нахождение области компромиссов не позволяет довести задачу до конца, но существенно сужает область поиска оптимального решения. На практике, предпочтительная альтернатива может быть выбрана волевым решением лица, принимающего решения, или с помощью одного из методов выбора решения из области компромиссов.

В работе рассмотрены различные методы выбора решений из области компромиссов и в качестве базового метода выбран метод функции полезности. В соответствии с методом функции полезности сформулированы понятия "полезности" подключения к сети Интернет для организаций наиболее актуальных типов: Интернет-магазин; организация, использующие сеть Интернет как транспорт для обмена информацией между офисами, поставщиками, покупателями; организация, осуществляющая поиск информации в сети Интернет; образовательная организация.

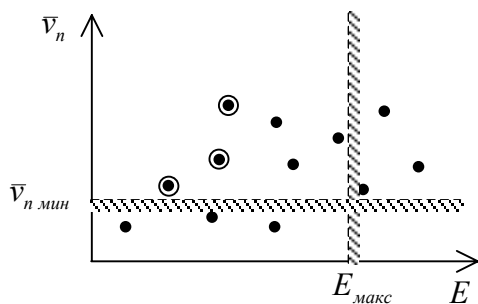


Рис. 12. Область компромиссов.

Также в четвертой главе приведены примеры практического применения разработанных методов. Произведен расчет и даны рекомендации по выбору скорости передачи данных Интернет-подключения Самарского государственного аэрокосмического университета и межвузовского медиацентра.

В заключении сформулированы основные результаты и предложены пути дальнейшего развития идей, предложенных в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

- Произведен анализ задачи оценки качества Интернет-подключения корпоративной сети, что позволило сформулировать основные требования к его моделям. Созданы математические модели, удовлетворяющие данным требованиям. На основе математических моделей сформулированы условия качества Интернет-подключения с точки зрения коллективного пользователя.
- На базе корпоративной сети Самарского государственного аэрокосмического университета выполнено обширное экспериментальное исследование, позволившее обосновать полученные теоретические модели.
- На основе предложенных моделей разработаны метод текущего контроля качества и метод выбора оптимальной скорости передачи данных Интернет-подключения корпоративной сети.
- Сделан расчет и даны рекомендации по выбору скорости передачи данных Интернет-подключения Самарского государственного аэрокосмического университета и межвузовского медиацентра.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Грачев В.Г., Симановский Е.А. Анализ внешнего трафика корпоративной сети Самарского государственного аэрокосмического университета и оптимизация использования ресурсов на его основе: Труды международной конференции Телематика 2001. – С.-Петербург: Редакционно-издательский отдел СПбГИТМиО, 2001.
2. Грачев В.Г., Симановский Е.А. Исследование структуры трафика корпоративной сети Самарского государственного аэрокосмического университета// Телекоммуникации и информатизация образования. – 2002. - №2(9). – с. 76-84.
3. Грачев В.Г., Симановский Е.А. Моменты скорости передачи данных Интернет-канала сети организации: Материалы всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”// Под редакцией И.Г. Мироненко, М.Н. Пиганова. – Самара: СГАУ, 2005. – с. 26-33.
4. Грачев В.Г. Модель внешнего Интернет канала организации// Аспирантский вестник Поволжья. – 2003. - №1. – с. 19-20.
5. Грачев В.Г., Симановский Е.А. О законе распределения времени между открытием пользовательских сессий во внешнем канале: Труды международной конференции Телематика 2002. – С.-Петербург: Редакционно-издательский отдел СПбГИТМиО, 2002.
6. Грачев В.Г., Долгих Д.Г., Шавалдин А.А. Операционная система Linux: Сборник докладов международного рабочего семинара “Цифровые сети в среднем Поволжье”. – Самара: ИВФ СМС, 1998. - 40с.
7. Грачев В.Г., Долгих Д.Г. Опыт создания и эксплуатации каналов связи, основанных на технике ИКМ: Сборник докладов международного рабочего семинара “Цифровые сети в среднем Поволжье”. – Самара: ИВФ СМС, 1998. - 40с.
8. Грачев В.Г., Симановский Е.А. Оценка необходимой полосы пропускания внешнего канала корпоративной сети: Труды международной конференции Телематика 2003. – Санкт-Петербург: Редакционно-издательский отдел СПбГИТМиО, 2003.
9. Грачев В.Г., Симановский Е.А. Оценка скорости передачи данных внешнего Интернет-канала организации для обеспечения требуемого качества подключения// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2006. - №1(9). – с. 236-243.

Подписано в печать 10.09.2006 г.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

ИПО Самарского государственного
аэрокосмического университета
443086, Московское шоссе, 34