

На правах рукописи

ГОЛЬДШТЕЙН Александр Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ТУННЕЛИРОВАНИЯ  
МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА В СЕТИ MPLS**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2004

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

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Г.Г. Яновский.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор В.А.Зеленцов;

кандидат технических наук,  
доцент Ю.В. Юркин

Ведущая организация – ИНТЕЛСЕТ-ТСС, Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 24 июня 2004 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета К.219.004.01 при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

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

Автореферат разослан 20 мая 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

В.Х. Харитонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований.** Структура трафика, передаваемого по сетям связи, сегодня сильно изменяется.Packetные сети используются для предоставления услуг передачи речи, прослушивания музыки, просмотра видеоклипов, организации мультимедийной конференц-связи, обеспечения мобильности абонентов, создания сетей IP-телефонии, распределенного моделирования, управления в режиме on-line, сетевых игр и других приложений в реальном времени.

Интернет-протокол (IP), который первоначально создавался для передачи датаграмм, рассматривался как непригодный для обслуживания трафика в реальном времени из-за того, что каждый пакет в потоке данных маршрутизируется независимо от других пакетов этого потока, и такие параметры, как пропускная способность, задержка и вариация задержки, изменяются в весьма широких пределах. К тому же, трафик реального времени больше подвержен влиянию перегрузок, чем трафик данных. Очевидно, что при использовании пакетных сетей для обслуживания трафика реального времени необходимо гарантировать качество обслуживания (Quality of Service, QoS), создавать средства для того, чтобы в периоды перегрузки IP-сети на трафик реального времени не оказывалось воздействия или, по крайней мере, этот тип трафика получил бы более высокий приоритет, чем остальные виды трафика.

Для обеспечения гарантированного качества обслуживания трафика реального времени были созданы самые разнообразные механизмы и протоколы, такие, как IntServ, DiffServ, RSVP и др. В последние несколько лет широкое распространение получила технология многопротокольной коммутации по меткам - MultiProtocol Label Switching (MPLS). Эта технология внедряется как в корпоративных сетях, так и в сетях общего пользования.

Технология MPLS является предметом усиленного внимания ряда международных организаций по стандартизации, в том числе, Комитета IETF (Routing Area Working Group – рабочая группа по маршрутизации – и MPLS Working Group – рабочая группа по MPLS), Форума ATM (Traffic Management Working Group – рабочая группа по управлению трафиком и ATM-IP Collaboration Working Group – рабочая группа по совместной работе сетей ATM и IP) и ряда других форумов, объединяющих производителей, операторов и разработчиков. Результаты работы групп IETF отражены в спецификациях RFC 3031-3038, 3107, которые и являются сегодня основными документами для реализации механизма MPLS.

Технология MPLS в настоящее время описана в большом числе работ, включая монографии (Э. Осборн, А. Симха «Управление трафиком в MPLS», Cisco Press, 2003, С. Харнеди «Введение в MPLS», PTR, 2002), статьи в научно-технических журналах, (Т. Нолле «MPLS: новый порядок в сетях IP?» LAN №5 1999, Б. Л. Сатовский «MPLS - технология маршрутизации для нового поколения сетей общего пользования», Сети и системы связи № 3,

2001) и многочисленные доклады на конференциях. Несмотря на обилие публикаций по MPLS практически отсутствуют аналитические исследования, направленные на изучение базовых аспектов обеспечения качества обслуживания в сетях MPLS, анализа процессов поведения IP-пакетов в таких сетях, поведения очередей, а также большого круга вопросов, касающихся функционирования туннелей в сетях MPLS.

Нерешенность указанных выше вопросов определяет актуальность данной диссертационной работы, в которой разрабатываются аналитические модели сети MPLS и исследуются практически все перечисленные выше вопросы.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертации состоит в анализе вероятностно-временных характеристик (VBX) механизма туннелирования в сети MPLS для обеспечения заданного качества обслуживания мультимедийного трафика и в разработке на основании этого анализа алгоритма организации туннелей в сети MPLS.

Поставленная цель определила необходимость решения следующих основных задач:

- разработка аналитической модели механизма туннелирования в сети MPLS;
- исследование эффектов сцепления пакетов в пачки и фрагментации пачек пакетов в туннеле;
- определение математического ожидания размера пачки в туннеле MPLS;
- расчет VBX транспортировки пакетов через туннель;
- сравнительный анализ VBX в сети MPLS с организацией туннеля и без использования механизма туннелирования;
- алгоритм организации туннеля в сети MPLS.

**Методы исследования.** В качестве основного аналитического аппарата в работе используется теория массового обслуживания, наряду с которой для изучения механизма туннелирования в сетях MPLS применялись также методы оптимизации, статистическое моделирование и др.

**Научная новизна** диссертации состоит в разработке моделей, позволяющих получить оценки VBX при транспортировке пакетов через сеть MPLS как для датаграммного режима, так и для наиболее интересного случая организации туннелей в сети.

Среди новых научных результатов отметим разработку аналитических моделей механизма туннелирования, что позволило получить важные результаты, определяющие период занятости в системе последовательных очередей, а также предложить алгоритм поиска эффективной стратегии для организации туннелей.

**Личный вклад.** Все результаты, составляющие содержание работы, получены автором лично. В главе 4 использованы материалы разработок мультисервисного абонентского концентратора и опытной зоны Softswitch, выполненных коллективами разработчиков при участии автора и реализующих на практике некоторые сформулированные в диссертации подходы к обеспечению QoS.

**Практическая ценность результатов работы.** Теоретические исследования, выполненные в работе, доведены до инженерных решений. Основные результаты работы внедрены при построении мультисервисной сети абонентского доступа BroadAccess ЗАО «Экран», в системном проекте сети следующего поколения NGN для ОАО «Межрегиональный ТранзитТелеком», в ОАО «Ленсвязь» при создании комплекса оборудования IP-телефонии на базе интеллектуальной платформы «Протей», в совместном проекте ЛОНИИС и Lucent Technologies по созданию опытной зоны Softswitch и в ряде других НИР и ОКР, выполненных при участии автора.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на VI Международном форуме МАИ, Москва, октябрь 2000г., 3-й Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов стран СНГ, Одесса, Украина, сентябрь, 2001г., 57-й Научной сессии, посвященной Дню радио, Москва, 2002 г., Российско-Германском научном семинаре СПбГУТ, 2003 г., 4-ой Международной конференции «Состояние и перспективы развития Интернет в России» Ассоциации Документальной Электросвязи, Москва, 2003, 2-й Международной конференции «Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN'04)», 2004 г., а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы в научно-технических журналах и трудах международных и всероссийских научных конференций опубликовано 18 печатных работ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем пояснительной записки 149 страниц, иллюстраций 35, список литературы насчитывает 130 наименований. В качестве приложений приведены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

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

В **первой главе** рассматриваются критерии и количественные характеристики качества обслуживания, QoS, трафика реального времени, в том числе, оценки уровня обслуживания, основанные на рекомендациях ITU-T, вероятности потери пакетов и составляющие задержки. Приводятся данные по допустимым нормам на потери пакетов при передаче речи по сети IP-телефонии, базирующиеся на международных проектах (TIPHON, ETSI). Проведенный анализ позволяет определить направление эволюции критериев и оценок качества обслуживания вызовов, принятых в традиционной

телефонии, до критериев и оценок QoS в сетях IP-телефонии, от вероятности потерь по формуле Эрланга в системах коммутации каналов до оценок вероятностей потерь в системах Voice over IP (VoIP), источником которых являются задержки.

Проведенный анализ показал, что с переходом от сетей с коммутацией каналов к IP-ориентированным сетям изменяются и методы обеспечения необходимого качества обслуживания. Если в традиционных сетях улучшение QoS достигалось путем увеличения числа приборов на АТС, то в IP-телефонии необходимо применение алгоритмов управления пропускной способностью, обеспечиваемых рядом механизмов, в числе которых все более видную роль играет технология MPLS, рассматриваемая в диссертации.

На рис.1 представлена обобщенная схема сети MPLS, из которой можно видеть, что суммарная задержка речевого трафика состоит из двух основных составляющих – задержек на кодирование/декодирование в сегменте доступа и задержек, вносимых сетью MPLS.

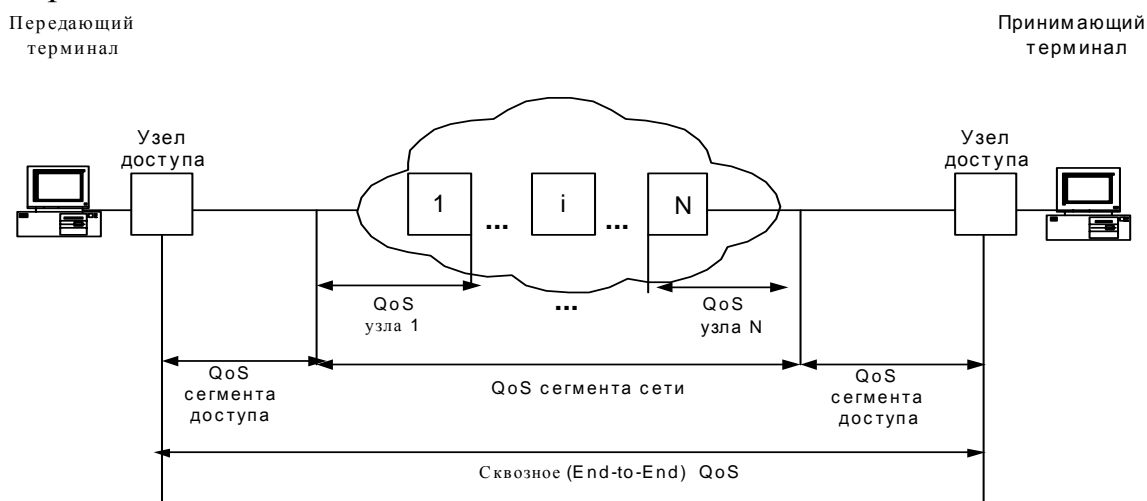


Рис.1. Иллюстрация понятия сквозного QoS

Далее в диссертации исследуется влияние технологии MPLS на параметры качества обслуживания сетевого сегмента.

В главе 2 разрабатывается функциональная модель туннелирования в сети MPLS и исследуется математическая модель последовательных очередей, представленная на рис.2. В нашей работе модель последовательных очередей описывает туннели, формируемые в сетях MPLS.

Первой работой, в которой исследовалось поведение последовательных очередей, была статья П. Бурке (1956), затем цепочки очередей изучались в работах Конхейма и Рейзера, Фича и Вейларда, Ле Галля, и др. Однако вопросы поведения пачечного трафика (характерного для IP-сетей) в цепочке последовательных очередей остаются открытыми.

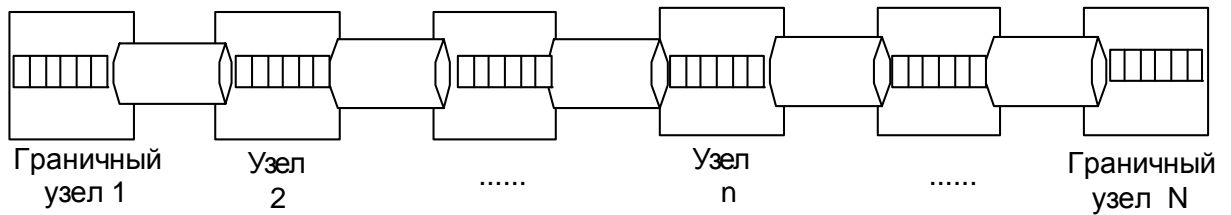


Рис.2. Модель последовательных очередей

В модели на рис.2 на вход граничного узла 1 поступает пуассоновский поток пакетов с интенсивностью  $\lambda$  и средним временем обслуживания пакета  $1/\mu$ . В данной главе на базе теоремы Бурке строится ряд моделей, описывающих поведение пачечного трафика в туннелях MPLS. Основными свойствами этого поведения являются процессы фрагментации и сцепления пачек пакетов в туннелях, оказывающие существенное влияние на качество обслуживания.

Процесс **сцепления** возникает в каждом узле  $n$ , начиная со второго ( $n \neq 1$ ), и определяется тем, что первый пакет  $k$ -й пачки пакетов догоняет в узле  $n$  последний пакет  $(k-1)$ -й пачки, и обе пачки -  $k$ -я и  $(k-1)$ -я – формируют новую пачку («сцепляются»), как это показано на рис.3-а.

Процесс **фрагментации** представлен на рис.3-б. Существо процесса фрагментации состоит в следующем. Пусть в первом узле обслуживается пакет номер  $j$  из пачки  $k$ , и в это время в этот же первый узел поступает следующий пакет номер  $j+1$ , время обслуживания которого превышает время обслуживания пакета  $j$ . Пусть в следующем (втором) узле в этот момент нет очереди, и пакет  $j$  обслуживается, как только он поступит в узел 2. Когда пакет  $j$  покидает узел 2, пакет  $j+1$  всё ещё продолжает обрабатываться в узле 1, поскольку время его обслуживания больше.

В диссертации показано, что в фиксированном туннеле процесс фрагментации может иметь место только в узле 2 ( $n=2$ ).

Аналитические модели механизма туннелирования в сетях MPLS, развитые в диссертационной работе, базируются на ряде Утверждений (всего в работе представлено 10 Утверждений), доказательство которых составляет основное содержание главы 2.

На основе Утверждений 1-3 анализируется поведение пакетов в узле  $n=2$ . Учитывая их важность для данного исследования, приведем их полностью.

Утверждение 1. Для исследуемой в работе модели туннелирования MPLS в условиях стационарности при значении загрузки  $\rho < 1$  любой пакет, принадлежащий пачке номер  $k$  на выходе узла  $n$  ( $n \geq 2$ ), имеет время обслуживания, которое меньше или равно времени обслуживания первого пакета этой пачки.

Утверждение 2. Любая пачка на выходе узла  $n=2$  и всех следующих узлов сохраняется, т.е. все пакеты в ней остаются жестко привязанными друг к другу.

Утверждение 3. Сцепление пачек  $k$  и  $k+1$ , поступивших из узла  $n-1$  в узел  $n$ , для исследуемой модели туннелирования MPLS возможно тогда и только тогда, когда первый пакет пачки  $k+1$  покидает узел  $n-1$  до того, как пачка  $k$  будет обслужена узлом  $n$  в течение интервала, не превышающего времени обслуживания первого пакета предыдущей пачки.

Доказательство Утверждений 1-3 приведено в диссертации и основывается на анализе на временной оси поведения потока пакетов, имеющего пачечную структуру.

Далее на основании первых трех Утверждений в главе 2 формулируются и доказываются Утверждения 4-7, позволяющие получить оценку для средней длины пачки  $k$  в произвольном узле  $n$ , выраженной в числе пакетов  $K_n$

$$\begin{aligned} K_n &= 1 + \frac{\rho}{1-\rho}, \text{ при } n=1, \\ K_n &\approx 1 + \frac{\rho}{1-\rho}, \text{ при } n=2, \\ K_n &= 1 + (n-1) \frac{\rho}{1-\rho}, \text{ при } n>2. \end{aligned} \quad (1)$$

В Утверждениях 8-10 обоснован переход от средней длины пачки (эквивалентной периоду занятости) ко времени пребывания пакета в туннеле MPLS. Доказательства этих Утверждений основывается на результатах книги Р. Конвея, В. Максвелла, Л. Миллера «Теория расписаний», монографии Л. Клейнрока «Теория массового обслуживания», а также на двух статьях Ле Галля. На основе полученных в этих работах результатов показано, что в условиях стационарности при  $\rho < 1$  функция распределения общего времени пребывания в туннеле из  $N$  узлов и для больших значений  $N$  может быть аппроксимирована выражением:

$$V(t;N) \cong \left( \frac{1-\rho}{1-\rho F(t)} \right)^{N+1} F(t), \quad (2)$$

где  $F(t)$  – функция распределения времени обслуживания в каждом узле.

Доказательство выражения (2) базируется на статье Ле Галля, в которой также обосновывается переход к функции плотности  $\frac{dV(t;N)}{dt}$ , позволяющий определить математическое ожидание времени  $v(n)$  пребывания произвольного пакета на одном узле (для узлов от второго до  $N$ ):

$$v(n) = \int_0^{\infty} t \frac{dV(x;n)}{dx} (t) dt.$$



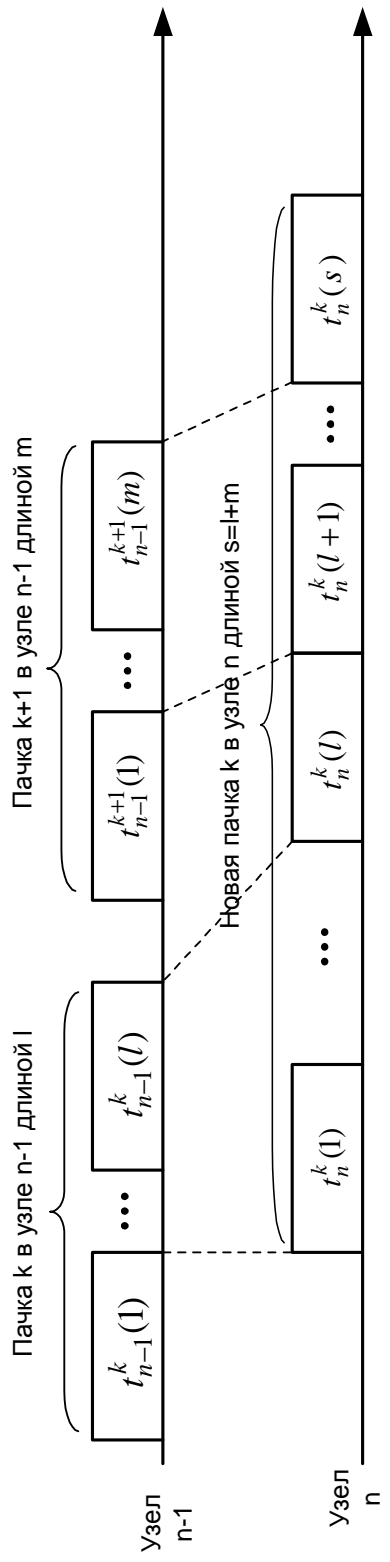


Рис.3-а. Сцепление пачек k-1 и k в узле n.

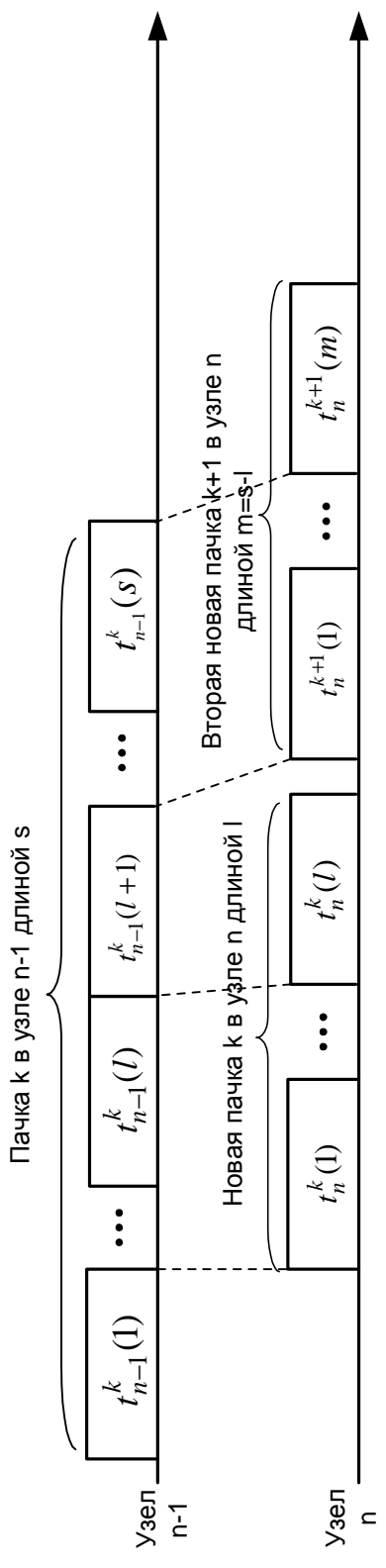


Рис.3-б. Фрагментация пачки k в узле n.

Интегрируя по частям, мы получим выражение для математического ожидания времени  $v(n)$  пребывания произвольного пакета в одном узле (для узлов  $n=[2, N]$ ):

$$v(n) = \int_0^{\infty} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + [\rho / (1 - \rho)] e^{-t}} \right)^n (1 - e^{-t}) \right] dt. \quad (3)$$

В результате преобразований в Утверждениях 8, 9 находим:

$$v(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} [1 - (1 - \rho)^i] + \frac{1}{n-1} \frac{1-\rho}{\rho} [1 - (1 - \rho)^{n-1}] + \ln\left(\frac{1}{1-\rho}\right).$$

С учетом того, что для больших значений  $n$  сумма  $\sum_{i=1}^{n-2} \frac{(1-\rho)^i}{i} \cong \ln(\rho)$ , а, кроме того, при больших  $n$  гармонический ряд  $\sum_{i=1}^{n-2} \frac{1}{i} \cong \ln(n-2) + \gamma + \frac{1}{2(n-2)}$ , где  $\gamma$  - постоянная Эйлера ( $\gamma \cong 0.577$ ), в работе получена следующая оценка величины  $v(n)$ :

$$v(n) \cong 1 + \ln\left[(n-2) \frac{\rho}{1-\rho}\right] + \gamma + \frac{1}{2(n-2)}. \quad (4)$$

Для очень больших значений  $n$  можно проигнорировать последнее слагаемое, и из (4) получаем инженерную формулу для времени пребывания  $v(n)$ :

$$v(n) \cong 1 + \ln\left[(n-2) \frac{\rho}{1-\rho}\right] + \gamma. \quad (5)$$

Переход от (3) к (5) доказывается в Утверждениях 8 и 9.

На базе формулы (5) для среднего времени пребывания пакета в одном узле находим суммарное среднее время пребывания произвольного пакета в туннеле MPLS из  $N$  узлов при  $\rho < 1$ :

$$V_1(N) \cong \ln[(N-2)! \left(\frac{\rho}{1-\rho}\right)^N] + N(1 + \gamma). \quad (6)$$

Индекс 1 в формуле (6) означает, что эта оценка приведена для среднего времени пребывания произвольного пакета в туннеле. Обозначение  $V_2(N)$ , введенное далее в главе 3, используется для среднего времени пребывания произвольного пакета в сети MPLS в случае, когда транспортировка пакета по сети MPLS производится без организации туннеля. При этом предполагается, что число узлов, через которые проходит пакет в этой сети, также равно  $N$ .

**В главе 3** проводится сравнительный анализ BBX транспортировки трафика VoIP реального времени с заданным уровнем качества обслуживания при двух разных вариантах организации маршрута LSP (Label Switching Path) в

сети MPLS - с созданием туннеля или без создания туннеля. Кроме того, в главе 3 также разрабатывается алгоритм поиска эффективной стратегии организации туннелей. Критерий эффективности базируется на сравнении суммарных затрат времени  $V_1(N)$  на пребывание пакетов в туннеле сети MPLS с затратами  $V_2(N)$  на прохождение того же маршрута (тех же  $N$  транзитных участков) при отказе от создания туннеля.

Для оценки  $V_2$  (режим датаграммной передачи) в диссертации используется модель М/М/1/К. Максимальное число  $K$  пакетов, которое узел может хранить в своей буферной памяти, для этой модели выбираем равным величине  $K_n$  из формулы (1). Предполагается, что потоки пакетов в этой модели являются такими же, что и в случае организации туннеля, а ограничение на размер буфера  $K$  выбрано так, чтобы условия в вариантах с наличием туннеля и при его отсутствии были абсолютно одинаковы.

Разница между  $V_1(N)$  и  $V_2(N)$  может быть также и в том, что без туннеля для всех пересылок одного пакета требуется  $N-1$  циклов обработки сигнализации и управления (один цикл на каждый маршрутизатор, кроме последнего), т.е. каждый пакет должен анализироваться  $N-1$  раз, в то время как в LSP-туннеле требуется один транзитный участок обработки сигнализации и управления для всех пересылок, т.е. каждый пакет должен анализироваться только один раз. Т.о., среднее время обслуживания того же самого пакета может увеличиться с  $1/\mu$  до  $(1/\mu + u)$  единиц, где  $u$  – время обработки метки в узле сети MPLS, зависящее от аппаратной реализации узла. Затраты на обработку меток в сетях MPLS без туннеля дают дополнительное преимущество организации туннеля, но т.к. в некоторых аппаратных реализациях эти временные издержки  $u$  могут быть исчезающе малыми, в представленных ниже численных расчетах мы будем полагать  $u=0$ , что подразумевает одинаковое время обработки пакета в маршрутизаторе при наличии и при отсутствии LSP-туннеля. В этом случае результат работы алгоритма даст выигрыш для самого неблагоприятного случая.

Решение о целесообразности организации туннеля или отказе от него базируется на сравнении выражений  $V_1(N)$  и  $V_2(N)$ . Оценка для  $V_2(N)$  приведена в качестве задачи, подлежащей решению в томе 1 монографии Л. Клейнрока под номером 3.14 (стр.132). Выражение (7) является решением этой задачи и с учетом принятых в диссертационной работе обозначений имеет следующий вид:

$$V_2(N) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\mu_2} \frac{1 - (K_n + 1)\rho_2^{K_n} + K_n\rho_2^{K_n+1}}{(1 - \rho_2^{K_n})(1 - \rho)} \quad (7)$$

Уравнение (7) определяет время пребывания пакета в LSP-пути длиной  $N$  без организации LSP-туннеля. В диссертации предлагается алгоритм принятия решения об организации LSP-туннеля, который основан на сравнении выражений (6) и (7).

Разработанный в диссертационной работе алгоритм принятия решения об организации LSP-туннеля, который рассматривается в следующем параграфе, наряду с формулами (6) и (7), базируется на важной особенности туннелирования MPLS определяемой моделью топологии MPLS. В случае MPLS туннели могут создаваться внутри сети для управления трафиком только в части сети. На маршруте LSP, содержащем  $M$  маршрутизаторов от входящего узла 1 до исходящего узла  $M$ , можно создать LSP-туннель, например, от входящего узла до узла  $N$  ( $N < M$ ). Это важно для практического применения разработанных в диссертации методов и моделей, например, в случае подключения локальной сети к глобальной некоторые из IP-пакетов пользователей могут направляться через туннели MPLS для обеспечения их специальной обработки.

С учетом этого полагается, что эффект, получаемый от организации туннеля, выражается разностью между  $V_1(N)$  и  $V_2(N)$ . Наличие этого эффекта мы начинаем проверять с максимально возможного  $N=M$ , т.е. с максимально длинного туннеля из конца в конец. Если при этом достигается положительный эффект, то принимается решение об организации туннеля. Если нет, то по вышеуказанной отличительной особенности MPLS-сети попытка поиска этого эффекта повторяется для более короткого пути  $N=M-1$ . В формализованном виде этот алгоритм выглядит следующим образом.

**Шаг 1.** Положим максимально возможное значение длины туннеля  $N = M$ .

**Шаг 2.** Для  $n = 1, 2, \dots, N$  определяется величина  $K_n$  по формуле (1).

**Шаг 3.** По формуле (7) определяется время  $V_2(N)$  пребывания пакета в LSP сети MPLS, содержащем  $N$  узлов (маршрутизаторов) без организации LSP-туннеля.

**Шаг 4.** По формуле (6) определяется время  $V_1(N)$  пребывания пакета в LSP-туннеле из  $N$  узлов.

**Шаг 5.** Сравниваются величины  $V_1(N)$  и  $V_2(N)$ . Если  $V_1(N) > V_2(N)$ , то организация туннеля между первым узлом и узлом  $n = N$  нецелесообразна. Производится переход к шагу 6. В противном случае принимается решение организовать туннель между первым узлом и узлом  $N$ , и работа алгоритма завершается.

**Шаг 6.** При  $V_1(N) > V_2(N)$  в узле  $N$  принимается решение об исключении узла  $N$  из рассмотрения как элемента возможного LSP-туннеля. Если  $N > 3$ , берется  $N = N - 1$  и производится возврат к шагу 2. Если  $N=3$ , то принимается решение об отказе от организации LSP-туннеля на данном LSP-маршруте, и работа алгоритма завершается.

Этот алгоритм позволяет выбрать эффективный LSP-туннель как по всему LSP-маршруту из  $M$  узлов (маршрутизаторов), так и по части LSP-маршрута, состоящей из  $N$  узлов ( $N < M$ ), или вообще отказаться от организации туннеля. Численный пример, иллюстрирующий применение алгоритма, приведен ниже.

Но прежде отметим, что в дополнение к анализу соотношения  $V_1(N)$  и  $V_2(N)$  для всего набора последовательностей из  $N$  узлов при  $N$  от 3 до  $M$ , существуют другие факторы, влияющие на принятие решения об организации

туннеля. Так, результат сравнения  $V_2(N)$  и  $V_1(N)$  зависит также от значений  $\mu_1$  и  $\mu_2$  обработки пакетов в маршрутизаторе при наличии туннеля и без него с учетом различных дисциплин, разных реализаций этих дисциплин в разных маршрутизаторах с разной производительностью. Даже, если считать стандартом де факто только маршрутизаторы CISCO, число возможных вариантов все равно будет весьма велико. Не вдаваясь в технические детали, далее в численном примере для наглядности принимаем  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ , но вполне возможна и разница значений  $\mu_1$  и  $\mu_2$  (на вышеупомянутое время обработки метки  $u$  в каждом узле), что также учитывается в формулах (6) и (7) и в разработанном алгоритме.

Следующий фактор, который может изменить определяемые приведенным алгоритмом решения, не связан с вероятностно-временными характеристиками, но зависит от таких причин, как требования информационной безопасности или организация с помощью туннелей виртуальной частной сети VPN и др.

Еще один фактор, который необходимо учитывать в реальных сетях, связан с нестационарностью интенсивности  $\lambda$ . В реальности интенсивность потоков пакетов изменяется во времени, причем характер этих изменений зависит от типа MPLS-сети, от структуры мультимедийного трафика, от сетевых конфигураций и т.д., что может требовать регулярного перерасчета туннелей с помощью приведенного алгоритма, осуществляемого администратором MPLS сети, и соответствующего пересмотра решений об организации тех или иных туннелей в данной сети MPLS.

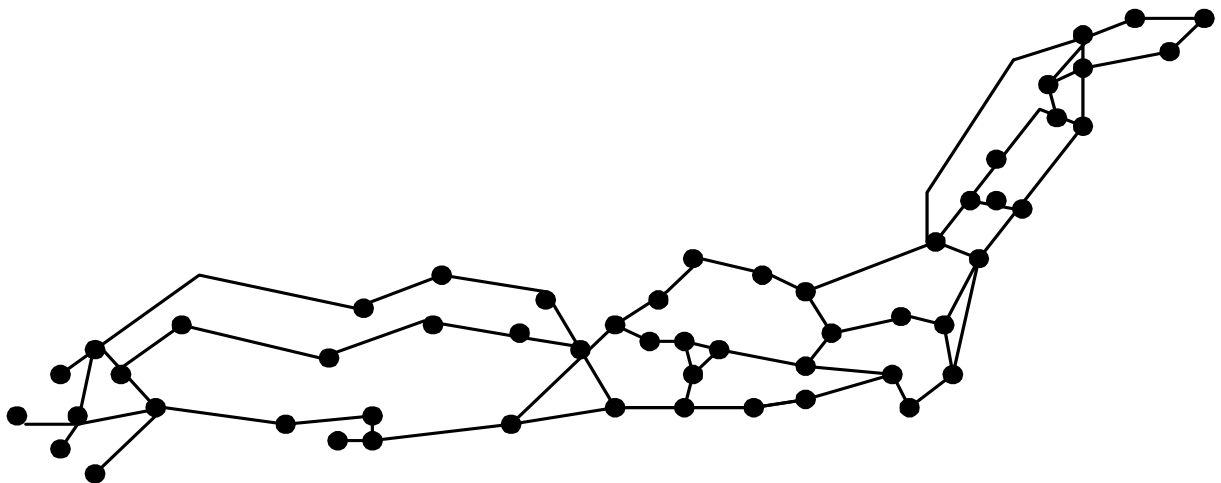


Рис.4. Пример сети MPLS

С учетом сделанных замечаний для иллюстрации разработанного алгоритма проведем анализ фрагмента сети MPLS (рис.4). Фрагмент состоит из  $M=50$  узлов, соединяемых LSP-путем, в котором можно создать LSP-туннель.

Пусть, для простоты, пропускная способность всех узлов одинакова, причем она одинакова как при наличии туннеля, так и без его организации. Размеры всех буферов равны  $K$  пакетов. Загрузка на LSP меняется в диапазоне от  $\rho=0.75$  до  $\rho=0.85$ .

Результаты расчетов представлены на рис.5-7. На этих рисунках видно, что при  $\rho=0.75$  организация туннеля целесообразна для  $N=14$ , при  $\rho=0.8$  организация туннеля эффективна для  $N=25$ , а при  $\rho=0.85$  организация туннеля эффективна во всем LSP-пути, т.е. при  $N=M=50$ .

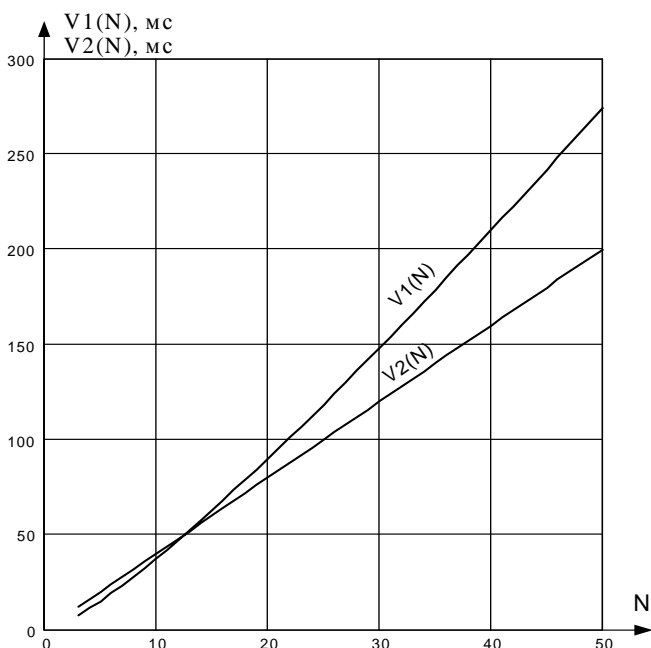


Рис.5. Результаты расчетов при  $\rho=0.75$

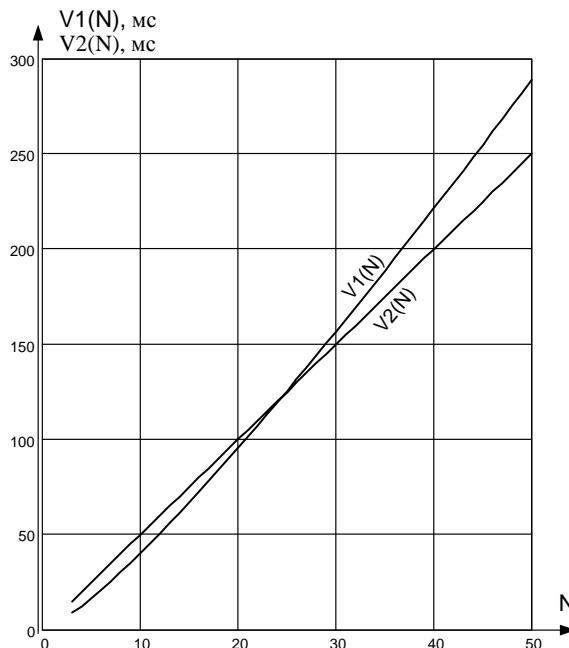


Рис.6. Результаты расчетов при  $\rho=0.8$

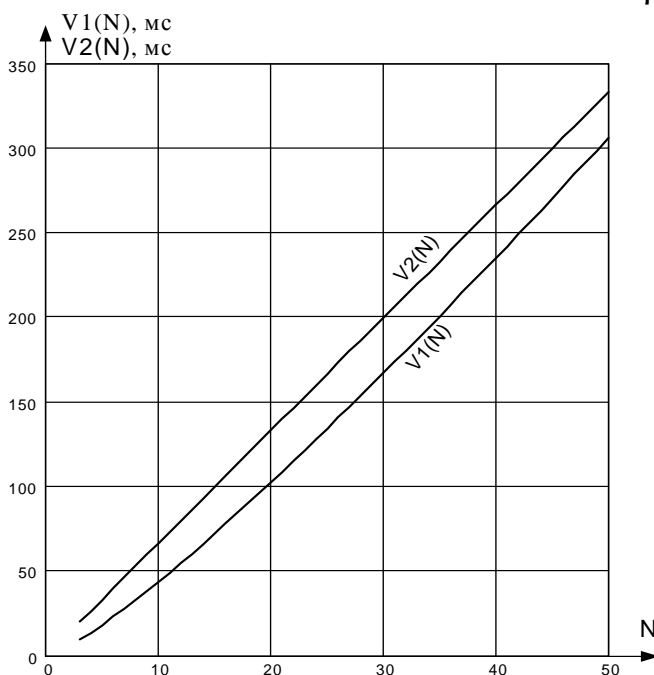


Рис.7. Результаты расчетов при  $\rho=0.85$

Теперь от величины  $V_1(N)$  среднего времени прохождения пакета по всему туннелю из  $N$  узлов вернемся к анализу  $v_1(n)$  среднего времени нахождения пакета в одном узле с произвольным номером  $n$  ( $n=1,2,\dots,N$ ). Эти

характеристики в значительной степени определяют качество обслуживания вызовов IP-телефонии, как показано в главе 1.

На рис. 8 и 9 приведены графики зависимости  $v_1(n)$  от  $n$  при значениях  $\rho=0.75$  и  $\rho=0.85$ , определяющие. Для сравнения на этих же рисунках приведены и кривые зависимости  $v_2(n)$  от  $n$  для тех же значений  $\rho$ .

Приведенные кривые иллюстрируют разницу между механизмом туннелирования, улучшающим, а затем и ухудшающим из-за процесса сцепления пачек вероятностно-временные характеристики прохождения пакета через очередной узел по мере увеличения номера  $n$  этого узла в туннеле. Там же видно и преимущества туннелирования за счет более быстрого прохождения пакетов через туннель.

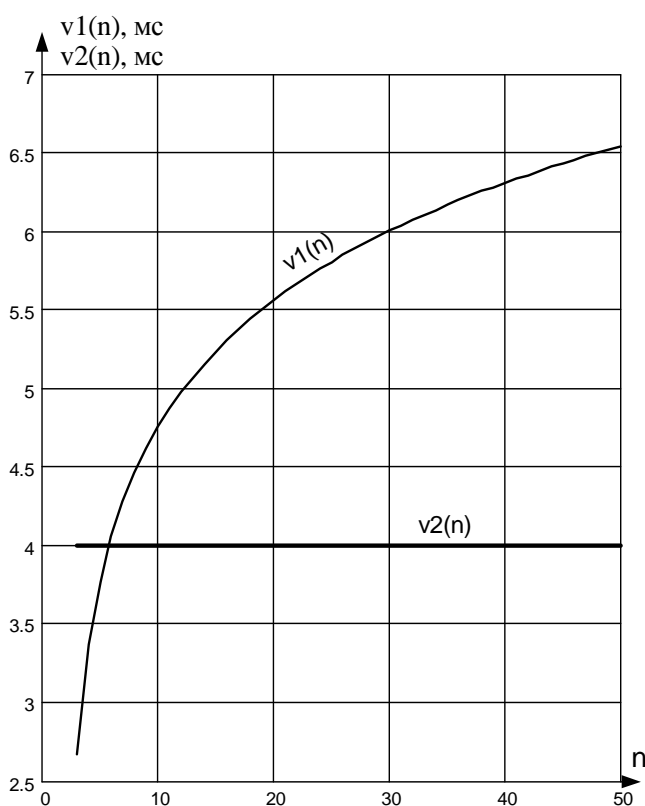


Рис.8. Результаты расчетов при  $\rho=0.75$

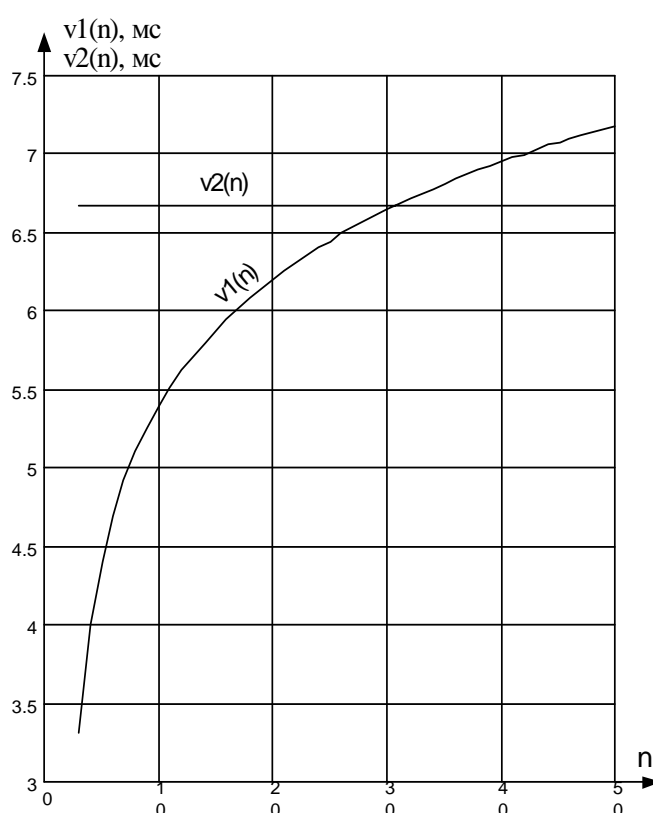


Рис.9. Результаты расчетов при  $\rho=0.85$

В главе 4 представлены некоторые инженерные аспекты проанализированных выше стратегий обеспечения качества обслуживания с помощью технологии MPLS и, в первую очередь, механизма туннелирования в MPLS для обеспечения рассмотренных в главе 1 требований QoS для мультимедийного трафика реального времени. Рассматривается реализация туннелей, исследованных ранее в диссертации, на базе процесса распределения меток снизу вверх, поддерживаемого протоколом распределения меток LDP (Label Distribution Protocol), согласно RFC 3036 и 3037.

В главе 4 рассмотрены также построение и применение таких сетевых элементов для обслуживания трафика реального времени, как программные

коммутаторы Softswitch и мультисервисные абонентские концентраторы. Предложен сценарий обмена сигнальными сообщениями протокола LDP, поддерживающий исследованный механизм туннелирования. Содержание главы 4 представляет собой базу для натурных экспериментов для проверки развитых в диссертационной работе аналитических моделей.

Далее в главе 4 обсуждаются возможные пути эволюции существующих сетей в направлении сетей связи следующего поколения (Next Generation Network, NGN) показано место разработанных в диссертации моделей и методов в процессе перехода NGN (см. рис.10). Основным объектом применения результатов диссертации является технология MPLS - правый нижний квадрат на рисунке, а сетевые аспекты их применения, рассмотренные в двух последних разделах главы 4, отображают два верхних квадрата на этом же рисунке.

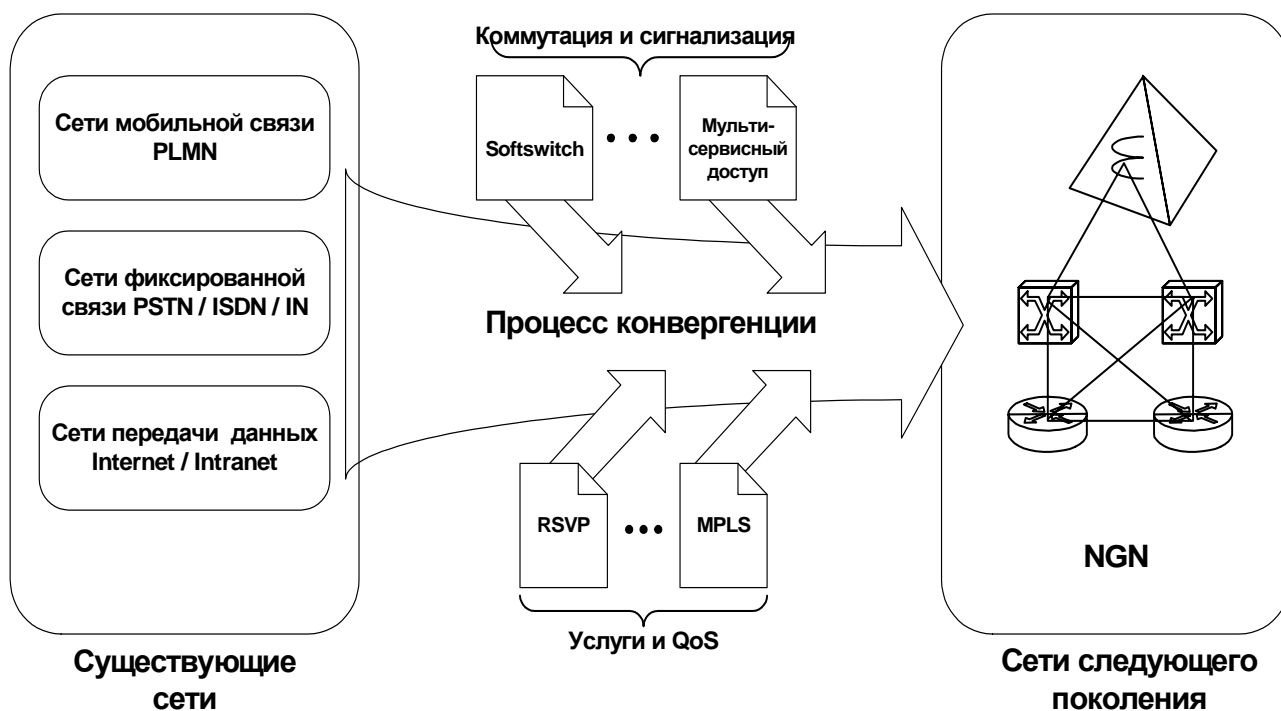


Рис.10. Миграция к сети следующего поколения NGN



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработана аналитическая модель последовательных очередей, описывающая механизм туннелирования в сети MPLS.
2. На базе разработанной модели исследованы процессы сцепления пакетов в пачки, сцепления пачек между собой, а также фрагментации пачек пакетов в LSP-туннеле.
3. Показано влияние процессов сцепления и фрагментации на вероятностно-временные характеристики (VBX) пачечного трафика в туннелях MPLS.
4. Проведен сравнительный анализ VBX пакетов в сети MPLS с туннелями и в сети MPLS без применения механизма туннелирования.
5. Предложен алгоритм организации LSP-туннеля в сети MPLS, обеспечивающего обслуживание трафика IP-телефонии с заданным QoS.

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Гольдштейн А.Б., Суховицкий А.Л. Модели управляющих устройств систем IP-телефонии//VI Международный форум по информатизации. Москва, 2-7 октября 2000 г. Международная конференция по информационным сетям и системам ICINAS-2000. Сборник трудов/М.: МАИ., 2000 г. – с. 508 - 512.
2. Гольдштейн А.Б. Об одной модели оценки качества обслуживания IP-телефонии//55 Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов 9-13 апреля 2001 г./Тезисы докладов. СПбГУТ.-СПб, 2001. - № 55. – с.14.
3. Гольдштейн А.Б. Механизмы обеспечения гарантированного качества обслуживания в сетях IP//3-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов стран СНГ. Одесса, Украина, сентябрь 2001г. – с. 23.
4. Гольдштейн А.Б.. Устройства управления мультисервисными сетями: Softswitch//Вестник связи. -М., 2002. -№4. – с. 105 – 112.
5. Гольдштейн А.Б. Построение виртуальных частных сетей (VPN) на базе технологии MPLS//54 Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 28 января – 1 февраля 2002 года/Материалы. СПбГУТ.-СПб, 2002. – с. 18.
6. Гольдштейн А.Б., Шурыгина С.Б. Построение современной сети доступа на базе мультисервисного абонентского концентратора// Вестник связи. - М., 2002. №12. с. 68 – 71.
7. Гольдштейн А.Б. Построение виртуальных частных сетей VPN на базе технологии MPLS//57-я Научная сессия, посвященная Дню радио. 15-16 мая 2002 г., Москва. Труды. Том 1/М.: МТУСИ, 2002. – с. 54 – 56.
8. Гольдштейн А.Б., Зарубин А.А., Саморезов В.В., Шурыгина С.Б. Программные коммутаторы и современные ТфОП//Технологии и средства связи. -М., 2002. №2.- с. 96 – 99.

9. Гольдштейн А.Б.. Проблемы перехода к мультисервисным сетям// Вестник связи. -М., 2002. №12. - с. 26-32.
10. Гольдштейн А.Б. Разработка модели MPLS /57 Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов 19-23 мая 2003/Тезисы докладов. СПбГУТ.-СПб, 2003.
11. Гольдштейн А.Б. Еще раз о Softswitch или сравнение реализаций трехгранной пирамиды// Вестник связи. -М., 2003. №9. - с. 40 - 53.
12. Гольдштейн А.Б., Саморезов В.В. IP-телефония: методические рекомендации к лабораторным работам (спец.200900)/СПбГУТ. СПб, 2003. – 84 с.
13. Гольдштейн А.Б. Применение мультисервисных абонентских концентраторов (МАК) на сети доступа//В сб. 4-я Международная конференция «Состояние и перспективы развития Интернет в России», Ассоциация Документальной Электросвязи, М., 2003 г. – с. 151 – 154.
14. Goldstein A., Yanovsky G. Traffic Engineering in MPLS Tunnels// International Conference on "Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN'04)". February 02-06, 2004.- p.200 - 202.
15. Гольдштейн А.Б. Аналитическая модель для расчета механизма туннелирования в MPLS/56-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 26-30 января 2004 года: материалы/СПбГУТ. -СПб., 2004.- с.17 - 18.
16. Гойхман В.Ю., Гольдштейн А.Б. Мультисервисный абонентский доступ //Технологии и средства связи. -М., 2004. №1.- с. 22 - 28.
17. Гольдштейн А.Б. Softswitch в 2004 году//Технологии и средства связи. Специальный выпуск «АТС. Коммутационное оборудование 2004» - М., 2004. №1, часть 2. с.13 - 16.
18. Гольдштейн А.Б. Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS// Вестник связи. –М ., 2004. №2. – с. 48 - 54.

---

Подписано в печать 16. 04. 04.  
Тираж 80 экз. Объем 1 печ.л.  
Заказ №9

---

Отпечатано в тип. СПбГУТ, 1911866 СПб, наб.р.Мойки, 61

Бесплатно