

На правах рукописи

**Трещановский Павел Александрович**

**Методы динамического управления пропускной способностью в  
многоканальных мультисервисных сетях абонентского доступа**

Специальность 05.12.13 — «Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникационные системы»  
Национального исследовательского университета МИЭТ

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Баринов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: Широ Георгий Эдуардович,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Вычислительная техника»,  
НИУ МИЭТ

Акимов Владимир Николаевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
главный инженер ЗАО «НИРИТ»

Ведущая организация: ФГУП «Субмикрон»

Защита диссертации состоится 26 февраля 2013 года в 10 часов на заседании совета Д 212.125.02 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Петраков А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Современные телекоммуникационные сети переживают стремительный рост объема передаваемого трафика и количества предоставляемых информационных услуг. Важнейшую роль в этом процессе играют мультимедийные услуги, такие как IP-телевидение, предоставление видео по запросу, IP-телефония и др. Известно, что для предоставления данных услуг необходимо соблюдение ряда требований к параметрам качества обслуживания, таких как задержка передачи, джиттер, вероятность потери и др. Строгие гарантии качества обслуживания обеспечиваются динамическим резервированием части пропускной способности сети доступа для передачи мультимедийного трафика. Однако из-за ограниченной пропускной способности сетей доступа, большого количества абонентов, а также сложных вероятностных свойств мультимедийного трафика такое резервирование часто приводит к неэффективному использованию сетевых ресурсов, а следовательно, к низкому количеству обслуживаемых абонентов или к низкому качеству предоставляемой услуги. Данная проблема может быть решена с помощью новых методов управления мультимедийным трафиком, более полно учитывающих его вероятностные и динамические свойства и обеспечивающих эффективное использование сетевых ресурсов за счет статистического мультиплексирования передаваемых потоков.

**Объектом исследования** являются многоканальные мультисервисные сети абонентского доступа.

**Предметом исследования** являются методы динамического управления ресурсами многоканальных мультисервисных сетей, а также вероятностные модели трафика и узлов коммутации.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью работы является повышение эффективности использования многоканальных мультисервисных сетей доступа. Для достижения этой цели необходимо

1. Разработать методы *динамического дифференцированного доступа* абонентов к ресурсам многоканальных мультисервисных сетей, повышающие эффективность использования пропускной способности при статистическом мультиплексировании независимых мультимедийных потоков.
2. Разработать методы моделирования сетей и систем телекоммуника-

ций, повышающие точность предсказания параметров качества обслуживания за счет использования вероятностных и динамических свойств мультимедийного трафика.

3. Разработать пути развития архитектуры сетей абонентского доступа на основе Ethernet-технологий, повышающие эффективность использования сетевых ресурсов при *дифференцированном обслуживании различных классов трафика*.
4. Подтвердить эффективность предложенных решений с помощью математических расчетов и имитационного моделирования.

### **Методы исследования**

При выполнении работы использованы методы стохастического сетевого исчисления, теории систем массового обслуживания, теории телетрафика, теории стохастических процессов и теории математической статистики. Результаты работы подтверждены имитационным моделированием в системе ns-3.

### **Научная новизна диссертации**

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем.

1. Разработана модель сетевого трафика на основе стохастической кривой поступления. Данная модель отражает свойство нестационарности динамического мультимедийного трафика за счет использования динамической кривой поступления. Сформулированы и доказаны свойства модели, позволяющие более точно предсказывать параметры качества обслуживания, такие как максимально возможная задержка передачи, в многоканальных сетях со статистическим мультиплексированием.
2. Разработан метод расчета параметров динамической кривой поступления. Данный метод позволяет увеличить коэффициент использования сетей доступа при передаче мультимедийного трафика через узел коммутации, описываемый кривой обслуживания.
3. Разработан метод динамического управления пропускной способностью мультисервисных сетей на основе предложенной модели трафика. Данный метод позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов благодаря адекватному учету вероятностных и динамических характеристик мультимедийного трафика.
4. Разработан алгоритм динамического резервирования сетевых ресурсов для передачи адаптивных мультимедийных потоков в сетях до-

стуга Ethernet с дифференцированным обслуживанием.

### **Практическая значимость**

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке алгоритмов управления трафиком в многоканальных мультисервисных сетях, при разработке узлов коммутации, а также при проектировании сетей абонентского доступа для повышения эффективности использования пропускной способности сети.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается использованием апробированных математических подходов и методов, а также расчетами и результатами математического моделирования в среде SciPy.

### **Личный вклад**

Все основные результаты диссертационной работы, включая положения, выносимые на защиту, получены лично автором диссертации.

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

1. Динамическая кривая поступления с экспоненциальной ограничивающей функцией отражает свойство нестационарности адаптивного мультимедийного трафика и позволяет уменьшить усредненную ошибку предсказания максимально возможной задержки передачи и длины очереди на 20-40 процентов.
2. Разработанный метод расчета параметров динамической кривой поступления позволяет увеличить коэффициент использования узлов коммутации со статистическим мультиплексированием на 15-35 процентов.
3. Предложенный метод динамического дифференцированного обслуживания на основе динамической стохастической кривой поступления позволяет увеличить абонентскую емкость многоканальных мультисервисных сетей доступа на 20-55 процентов.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и межвузовских научно-технических конференциях.

- Шестнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2010.
- Международная научно-техническая конференция, посвященная 40-летию образования МГТУ ГА, «Гражданская авиация на современном

этапе развития науки, техники и общества», Москва, май 2011.

- 66-я всероссийская конференция, посвященная Дню радио, Москва, май 2011.
- Семнадцатая и восемнадцатая всероссийские межвузовские научно-технические конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и Информатика», Зеленоград, апрель 2010 и 2011.

### **Публикации**

Результаты проведенного исследования опубликованы в 11 работах. Из них 3 публикации из перечня ВАК, 1 статья в трудах конференции и 7 тезисов докладов в трудах перечисленных выше конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 102 наименований. Объем диссертации составляет 156 страниц текста и включает 53 рисунка и 2 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, представлена практическая ценность, а также кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** исследованы известные методы динамического управления трафиком в многоканальных мультисервисных сетях.

Исследован метод интегрированного обслуживания мультимедийного трафика. Данный метод основан на расчете максимально возможных значений параметров качества обслуживания QoS (Quality of Service) при передаче заданного набора мультимедийных потоков через сеть доступа с известной пропускной способностью. Для этого каждый поток данных описывается математической моделью, определяющей максимально возможный объем данных потока, передаваемых в сеть на произвольном интервале времени. Такая модель называется кривой поступления потока.

Каждый узел коммутации на пути передачи потока характеризуется моделью, определяющей минимальный объем данных этого потока, обслуженных за некоторое произвольное время. Эта модель называется кривой обслуживания узла коммутации. Благодаря свойству конкатенации вся цепочка узлов коммутации, обслуживающих рассматриваемый поток, может быть охарактеризована одной кривой обслуживания, равной мин-плюс

свертке кривых обслуживания отдельных узлов. Упомянутая пара моделей позволяет рассчитывать максимально возможные значения задержки передачи и длины очереди узла коммутации. В сети с интегрированным обслуживанием каждому потоку выделяется часть пропускной способности, описываемая независимой от других потоков кривой обслуживания. Запрос на передачу потока принимается только в том случае, если рассчитанные значения параметров QoS не превышают допустимые.

Исследован также метод дифференцированного обслуживания мультимедийного трафика. Этот метод основан на расчете максимально возможных значений вероятностных параметров качества обслуживания при заданной допустимой вероятности превышения этих параметров. Для этого каждый поток данных характеризуется вероятностной моделью, называемой стохастической кривой поступления. Такая модель позволяет определять остаточную кривую обслуживания, предоставляемую остальным потокам, делящим один узел коммутации. Названная пара моделей позволяет рассчитывать вероятностную задержку передачи и длину очереди. В сети с дифференцированным обслуживанием пропускная способность, описываемая кривой обслуживания, предоставляется группе потоков одного класса трафика. Запрос на передачу потоков принимается только в том случае, если значения вероятностных параметров QoS для всех потоков агрегированной группы не превышают допустимые.

В диссертационной работе дана оценка эффективности использования пропускной способности многоканальной сети абонентского доступа для рассмотренных методов управления сетевыми ресурсами. В качестве критерия эффективности предложен коэффициент использования  $k$ , равный отношению суммы усредненных скоростей  $r$  передаваемых потоков к общей пропускной способности сети  $R$ . В качестве обслуживаемых потоков использованы видео-фрагменты, типичные для мультимедийных услуг IPTV и видео по запросу. В качестве передающих узлов использованы коммутаторы, применяемые в сетях абонентского доступа операторов связи. Для имитации длинных линий связи использована функция ограничения скорости передачи портов коммутаторов. Количество передаваемых потоков вычислено с помощью методов интегрированного и дифференцированного обслуживания при условии, что потери кадров отсутствуют, а задержка передачи для любого кадра не превышает 100 мс. Установлено, что в диапазоне скоростей, типичном для сетей доступа, коэффициент использования сети значительно ниже максимального значения (рис. 4а). Более

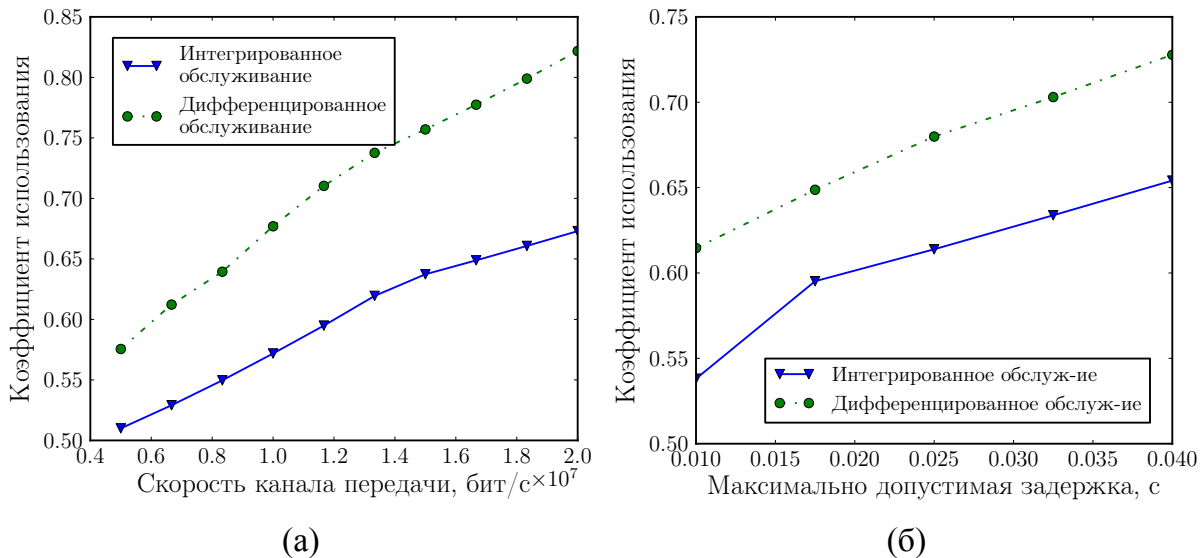


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования от параметров сети доступа: а) пропускная способность сети; б) максимально допустимая задержка передачи

высокая эффективность дифференцированного обслуживания объясняется эффектом статистического мультиплексирования, обеспечиваемого агрегированным обслуживанием потоков.

В работе показано, что относительно низкая эффективность использования сетевых ресурсов обусловлена высокими требованиями к качеству обслуживания трафика и ограниченной пропускной способностью узлов коммутации в случае, когда максимально допустимая задержка передачи (рис. 4б) и длина очереди узла коммутации находятся в диапазоне, типичном для мультисервисных сетей абонентского доступа.

Рассмотрен регулируемый видео-поток с двумя уровнями скорости, каждому из которых соответствует фиксированный набор коэффициентов квантования. Выбраны уровни скорости, удовлетворяющие требованиям к качеству видео-данных для мультисервисных сетей. Разность между значениями PSNR (peak signal-to-noise ratio) составляет 10 дБ. Регулируемый поток передается через коммутатор сети доступа. Для всех фрагментов потока с одинаковым уровнем скорости построены кривые поступления и рассчитаны параметры качества обслуживания в соответствии с методами интегрированного и дифференцированного обслуживания.

Установлено, что известные методы динамического управления пропускной способностью обладают следующим недостатком. Предсказанные



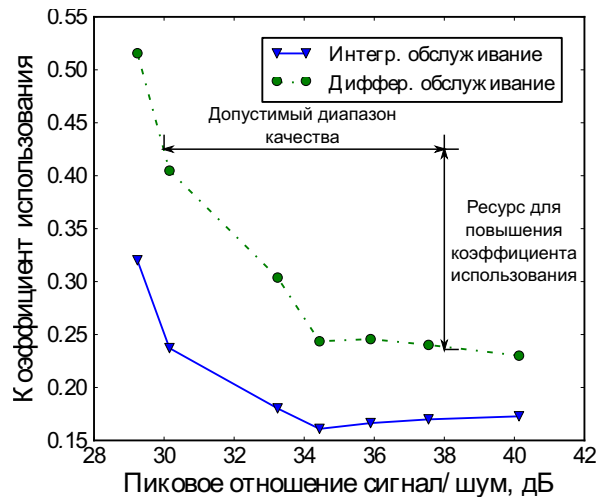


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования от качества видео-потока

значения параметров QoS оказываются либо слишком низкими, что приводит к низкому качеству обслуживания, либо слишком высокими, что приводит к резервированию избыточной пропускной способности.

Определена зависимость коэффициента использования от уровня качества PSNR для нескольких видео-фрагментов. Диапазон значений PSNR выбран таким образом, чтобы обеспечить соблюдение требований к качеству видео для услуги SDTV. Показано, что при таких условиях возможно существенное повышение эффективности использования пропускной способности за счет учета динамических свойств трафика (рис. 2).

Во второй главе разработана вероятностная модель трафика, более точно отражающая динамические свойства регулируемых мультимедийных потоков, с целью уменьшения ошибки предсказания максимально возможных параметров QoS.

Предложен регулятор трафика с переменной пропускной способностью. Предложена модель такого регулятора в виде регулируемой кривой обслуживания. Показано, что данная модель позволяет рассчитывать значения динамических параметров качества обслуживания, таких как максимально возможная задержка передачи и максимально возможная длина очереди на заданном интервале времени.

На основе модели регулятора дано следующее определение динамической кривой поступления, характеризующей регулируемый мультимедийный поток.

**Определение 1.** Пусть поток данных с кумулятивной функцией  $A(t)$  пода-

ется на узел коммутации с регулируемой кривой обслуживания  $\alpha(\tau, t)$ , называемый виртуальным коммутатором. Тогда этот поток описывается динамической кривой поступления  $\langle \alpha(\tau, t), f(\sigma, t) \rangle_{\Theta}$ , если для любого момента времени  $t$  длина очереди виртуального коммутатора  $Q(t)$  удовлетворяет следующему неравенству:

$$P\{Q(t) > \sigma\} \leq f^{\Theta}(\sigma, t),$$

где  $f^{\Theta}(\sigma, t)$  - ограничивающая функция, а  $\Theta > 0$ .

В работе доказаны следующие свойства предложенной модели трафика.

**Максимально возможная задержка передачи.**

**Теорема 1.** Пусть поток  $A(t)$ , описываемый динамической кривой поступления  $\langle \alpha(\tau, t), f(\sigma, t) \rangle_{\Theta}$ , подается на узел коммутации с кривой обслуживания  $\beta(\tau)$ . Тогда в любой момент времени  $t \geq 0$  задержка передачи через узел коммутации  $d(t) = \inf\{u \geq 0 : A(t) \leq D(t)\}$  удовлетворяет следующему неравенству:

$$P\{d(t) > d_{max}^{\sigma}(t)\} \leq f^{\Theta}(\sigma, t),$$

где максимально возможная в момент времени  $t$  задержка  $d_{max}^{\sigma}(t)$  равна горизонтальному расстоянию между функцией  $\alpha(\tau, t) + \sigma$  и кривой обслуживания  $\beta(\tau)$ , а  $\sigma$  - допустимая вероятность превышения максимальной задержки.

**Максимально возможная длина очереди.** Если поток данных характеризуется некоторой динамической кривой поступления, а обслуживающий его узел коммутации характеризуется кривой обслуживания, то максимально возможная длина очереди узла коммутации является функцией вертикального расстояния между этими кривыми, и вероятность превышения этой длины очереди не превосходит заданное допустимое значение.

**Свойство суперпозиции.** Если два потока характеризуются известными динамическими кривыми поступления, то агрегированный поток также характеризуется некоторой динамической кривой поступления.

Для доказательства следующего свойства введена дополнительная модель узла коммутации, называемая динамической кривой обслуживания.

**Определение 2.** Пусть поток данных с кумулятивной функцией поступления  $A(t)$  поступает на некоторый узел коммутации. Предоставляемая потоку пропускная способность характеризуется динамической кривой обслуживания  $\langle \beta(t), g(\sigma) \rangle_{\Theta}$ , если выходная кумулятивная функция этого потока  $D(t)$  удовлетворяет следующему неравенству

$$P\left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} \{A \otimes \beta(s) - D(s) - \Theta \cdot (t - s)\} > \sigma \right\} \leq g^{\Theta}(\sigma)$$

где  $f(\sigma)$  - ограничивающая функция,  $\Theta \geq 0$ , а  $\otimes$  - свертка в алгебре мин-плюс.

**Остаточная кривая обслуживания.** Если узел коммутации, описываемый кривой обслуживания, передает два потока, описываемые динамическими кривыми поступления, то пропускная способность, предоставляемая второму потоку, характеризуется динамической кривой обслуживания, определяемой кривой обслуживания коммутатора и кривой поступления первого потока.

Доказательства перечисленных свойств основаны на поиске некоторого известного события  $E_2$ , включающего в себя рассматриваемое событие  $E_1$  с неизвестной вероятностью:  $E_2 \subseteq E_1$ . Тогда верхняя грань вероятности  $P(E_1)$  равна известной вероятности  $P(E_2)$ . В качестве события  $E_2$  удобно использовать превышение некоторого уровня наполнения в очереди виртуального коммутатора или функцию от этого события.

Выведены следствия из доказанных теорем, позволяющие определять индивидуальную остаточную пропускную способность, а также параметры качества обслуживания для произвольного набора потоков, характеризующих динамическими кривыми поступления и передаваемых через узел коммутации со статистическим мультиплексированием. С учетом известного свойства конкатенации кривой обслуживания доказанные свойства позволяют определять параметры QoS при передаче агрегированного потока через произвольную цепочку узлов коммутации.

С целью повышения коэффициента использования сетей доступа с агрегированным обслуживанием в диссертации разработан метод расчета параметров динамической кривой поступления для потока, заданного кумулятивной функцией. Данный метод позволяет определять следующие параметры кривой поступления.

- Скорость затухания ограничивающей функции, которая определяет избыточную предсказанную задержку (длину очереди), связан-

ную с использованием экспоненциальной функции для характеристики произвольных потоков. Рассчитывается максимально допустимая скорость затухания для заданного виртуального коммутатора.

- Скорость виртуального коммутатора, определяющую соотношение между пропускной способностью, резервируемой для обслуживания данного потока, и предсказанными значениями параметров QoS. Для сети с заданной пропускной способностью определяется скорость, обеспечивающая наибольшее количество обслуживаемых потоков.
- Длительность переходного этапа при смене уровня скорости, определяющую время, в течение которого данные с предыдущим уровнем скорости оказывают влияние на параметры качества обслуживания для данных с новым уровнем скорости. Для заданной резервной пропускной способности канала рассчитывается минимальная длительность переходного этапа.

Исходными данными для расчета параметров является пропускная способность канала передачи, заданная кривой обслуживания и кумулятивная функция передаваемого потока или его фрагмента. Предложенный метод расчета основан на поиске значений скорости виртуального коммутатора, при которых в заданном канале передачи обеспечиваются гарантии качества обслуживания для каждого потока. Количество потоков определяется в расчете на полную загрузку канала при агрегированном обслуживании трафика. Для расчета параметров QoS используются доказанные в диссертации теоремы о максимально возможной задержке передачи и максимально возможной длине очереди. Выбор параметров кривой поступления производится с использованием известных методов численной оптимизации.

В среде моделирования ns-3 проведено измерение параметров качества обслуживания при передаче видео-потока через цепочку узлов коммутации. Для этого разработана следующая имитационная модель сети доступа (рис. 3). В качестве приемника и передатчика данных используются модули Node, на которые установлен сетевой стек ipv4. Каждый узел имеет сетевой интерфейс Ipv4Interface, канальный уровень которого реализует модуль NetDevice. Транспортный уровень реализуется с помощью UDP-сокетов. Каждый коммутатор представляет собой модуль BridgeNetDevice с двумя интерфейсами канального уровня. Узлы сети соединяются между собой каналами передачи csma. Через данную сеть передается видео-поток, определенный последовательностью времен подачи видео-кадров и последовательностью размеров кадров. С помощью встроенных трассировщиков

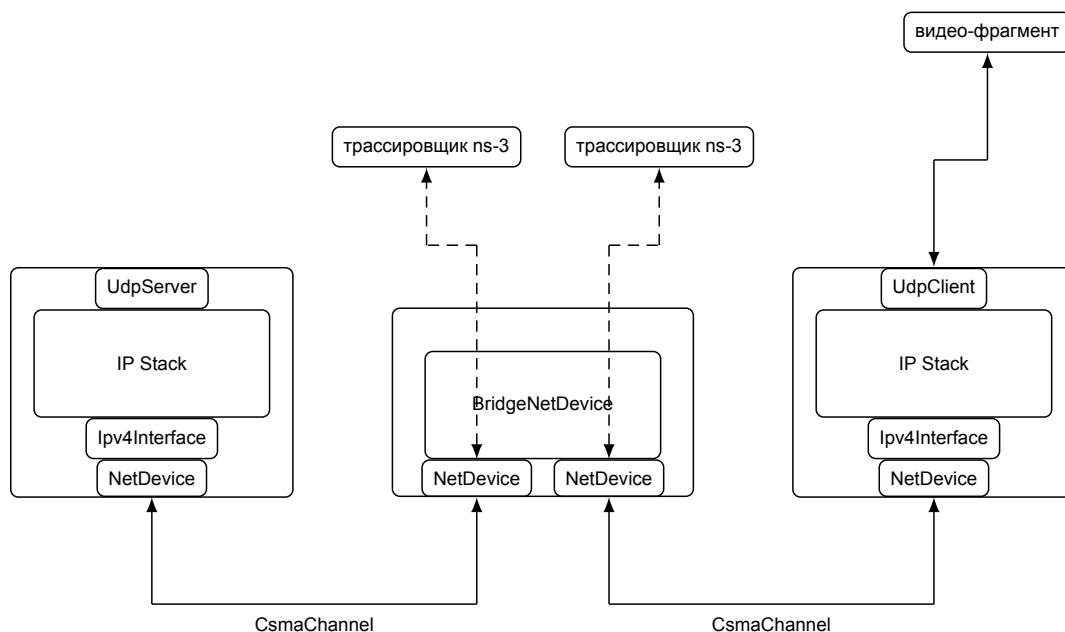


Рис. 3. Имитационная модель сети доступа в среде ns-3

среды ns-3 производится измерение времен приема и передачи кадров на интерфейсах коммутаторов. На основании этих измерений вычислены задержки передачи каждого кадра и последовательности длин очередей каждого коммутатора.

Для определения ошибки, вносимой имитационными моделями, проведен эксперимент на оборудовании мультисервисного абонентского доступа. Для этого собрана сеть, состоящая из двух компьютеров, соединенных цепочкой Ethernet-коммутаторов. Через эту сеть передается тот же видеопоток, что был использован в имитационном моделировании. В ходе эксперимента для каждого кадра проведено измерение времени отправки на передающем компьютере и времени получения на принимающем компьютере. Для сопоставления этих времен проведена предварительная синхронизация системных часов двух компьютеров с помощью протокола NTP (Network Time Protocol). На основании измеренных значений произведено вычисление задержек передачи каждого кадра через цепочку коммутаторов, а также длин очередей коммутаторов в моменты приема или отправки кадров. При вычислении были учтены задержки, вносимые программной и аппаратной обработкой на передающем и принимающем компьютерах. Установлено, что для выбранных имитационных моделей ns-3 ошибка предсказания задержки передачи не превышает время передачи кадра мак-

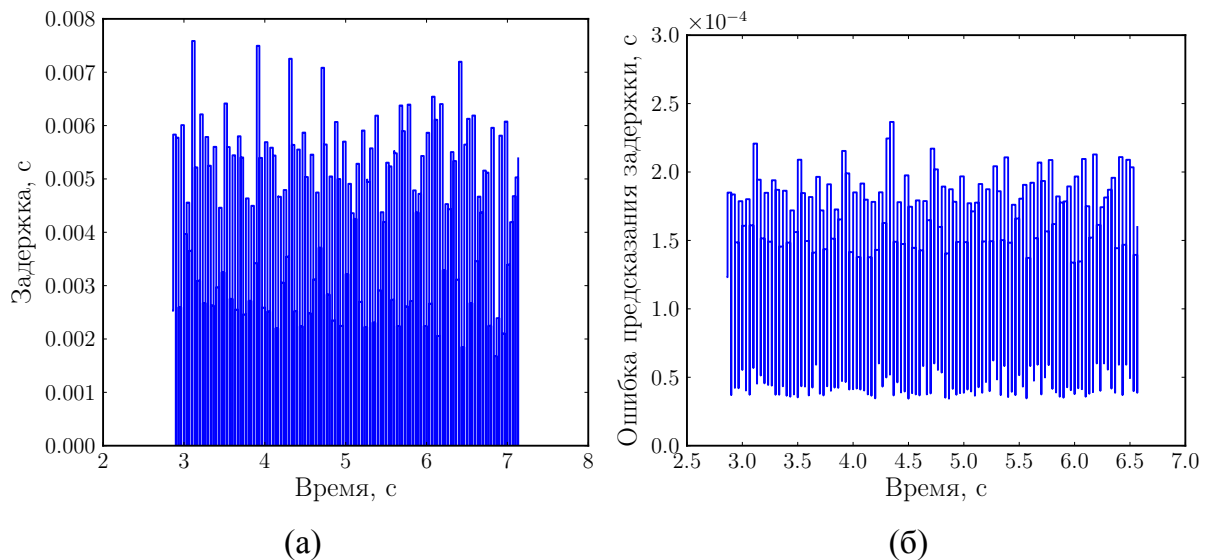


Рис. 4. Результаты моделирования в среде ns-3: а) задержка передачи; б) ошибка предсказания задержки передачи

симального размера, а ошибка предсказания длины очереди не превышает длину кадра максимального размера. Это доказывает, что моделирование в среде ns-3 можно использовать для прогнозирования параметров качества обслуживания и сравнения моделей мультимедийных потоков.

Произведен расчет параметров QoS, предсказанных динамической кривой поступления для мультимедийных потоков, передаваемых через цепочку узлов коммутации. В качестве передаваемых данных использованы видео-потоки, представляющие типичные для мультисервисных сетей виды трафика. При расчете использован предложенный метод определения параметров динамической кривой поступления, а также доказанные в работе теоремы о максимально возможной задержке передачи и максимально возможной длине очереди. С помощью разработанной имитационной модели сети доступа определена ошибка предсказания параметров QoS для динамической кривой поступления. Установлено, при использовании коммутаторов со скоростями передачи в диапазоне от 5 до 1000 Мбит/с предложенная динамическая кривая поступления обеспечивает уменьшение усредненной ошибки предсказания максимальной задержки и длины очереди на 40-60 процентов по сравнению с существующими моделями (рис. 5а, 5б).

В **третьей главе** разработан метод динамического резервирования пропускной способности в сетях доступа на основе предложенной модели тра-

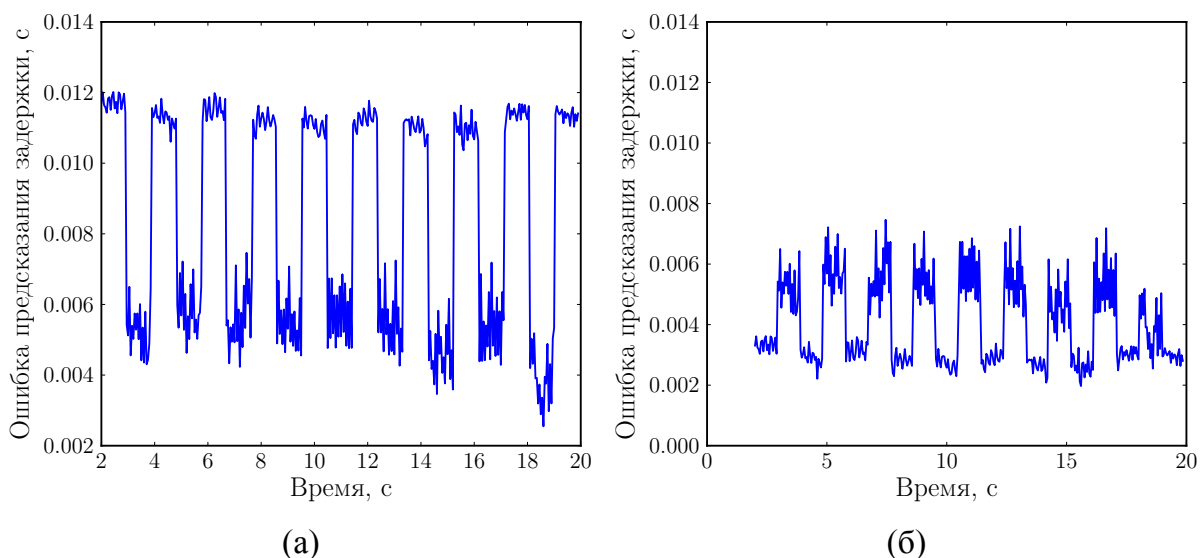


Рис. 5. Ошибка предсказания задержки передачи: а) стохастическая кривая поступления; б) динамическая кривая поступления

фика с целью повышения эффективности использования сетевых ресурсов.

Рассмотрены многоканальные сети доступа, допускающие частичное пересечение маршрутов передачи потоков, к которым, в частности, относятся сети древовидной топологии с произвольным мультиплексированием и демультимплексированием потоков. Показано, что свойство конкатенации кривых обслуживания на такие сети не распространяется, и следовательно, условия существующих теорем о максимально возможных значениях параметров QoS не соблюдаются. Для двух влияющих потоков определены следующие основные виды пересечений маршрутов доставки.

- Области пересечений с основным потоком для различных влияющих потоков не имеют общих узлов коммутации.
- Области пересечений влияющих потоков совпадают.
- Область пересечения одного влияющего потока с основным потоком включает в себе область пересечения другого влияющего потока.
- Области пересечения влияющих потоков с основным потоком частично совпадают (рис. 6).

С помощью теории сетевого исчисления в диссертационной работе доказаны теоремы об остаточной кривой обслуживания для каждого вида пересечений. В частности, для частично совпадающих областей пересечения

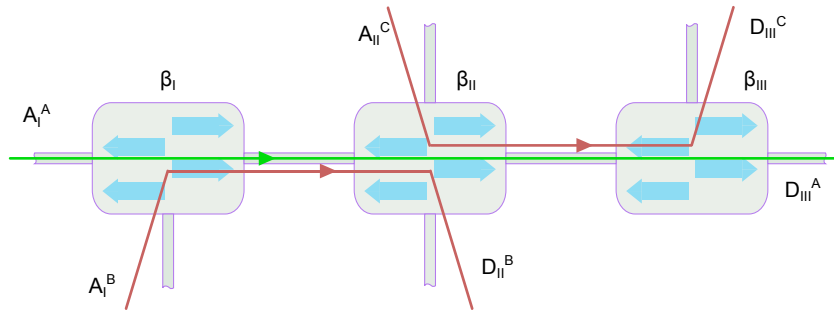


Рис. 6. Сеть доступа с пересекающимися маршрутами доставки

остаточная кривая обслуживания определяется следующим равенством:

$$\alpha_{LO}(\tau, t) = (\beta_I - \alpha^B) \otimes (\beta_{II} - \Theta) \otimes (\beta_{III} - \alpha^C),$$

где  $\alpha^B$  и  $\alpha^C$  - динамические кривые поступления влияющих потоков,  $\beta_I$ ,  $\beta_{II}$ ,  $\beta_{III}$  - кривые обслуживания узлов коммутации, а  $\Theta > 0$ . Доказанные теоремы позволяют рассчитывать параметры качества обслуживания в сетях доступа с мультиплексированием и демультимплексированием для потоков с произвольными маршрутами доставки.

на основе предложенной модели мультимедийного трафика разработан метод динамического управления пропускной способностью сети абонентского доступа. Данный метод заключается в динамическом регулировании скорости передаваемых мультимедийных потоков в зависимости от уровня загрузки сети доступа. Для осуществления такого регулирования в архитектуру сети доступа предложено ввести новый элемент, называемый контроллером сетевых ресурсов и выполняющий резервирование пропускной способности, необходимой для обеспечения качества обслуживания передаваемых потоков. Перераспределение сетевых ресурсов производится во время установки или разрыва соединений между мультимедийным сервером и абонентами сети доступа (рис. 7).

При установке новой сессии мультимедийный сервер отправляет контроллеру сетевых ресурсов запрос на резервирование, содержащий параметры динамической кривой поступления для каждого уровня скорости, поддерживаемого предоставляемым потоком. В случае успешного резервирования контроллер сетевых ресурсов сообщает серверу доступный уровень скорости для запрашиваемого потока и для других потоков, использующих общие с ним сетевые ресурсы. В случае отсутствия необходимой пропускной способности соединение с абонентом разрывается.



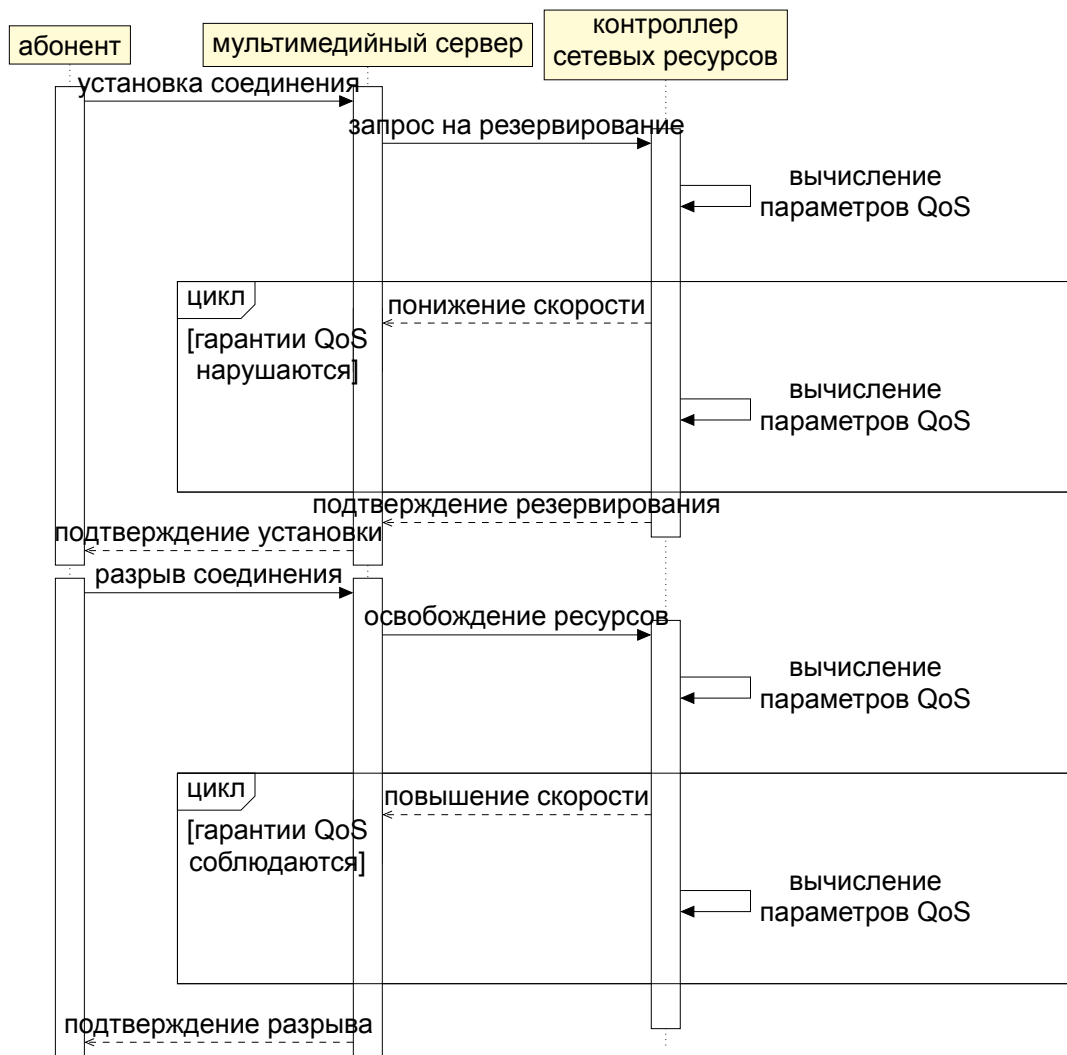


Рис. 7. Протокол динамического резервирования сетевых ресурсов

Контроллер сетевых ресурсов принимает решение о резервировании на основе данных о топологии сети, а также набора кривых обслуживания, характеризующих отдельные узлы коммутации. При завершении мультимедийной сессии сервер отправляет запрос на освобождение пропускной способности, и контроллер сетевых ресурсов повышает уровень скорости для той части потоков, чей маршрут доставки ранее был перегружен.

В диссертации разработан алгоритм динамического резервирования пропускной способности для контроллера сетевых ресурсов (рис. 8). При заданном множестве обслуживаемых потоков и сети доступа с известной пропускной способностью данный алгоритм позволяет определить уровни

скорости, обеспечивающие необходимое качество обслуживания для всех потоков. Если при резервировании ресурсов для нового мультимедийного потока происходит нарушение гарантий качества обслуживания, предложенный алгоритм понижает уровни скорости потоков, проходящих через перегруженный участок сети. Вычисление параметров QoS производится на основе теорем о максимально возможной задержке (теорема 1) и максимально возможной длине очереди при заданной допустимой вероятности превышения этих значений. Пропускная способность, предоставляемая рассматриваемому потоку, определяется с помощью предложенной модели, опирающейся на доказанные ранее теоремы об остаточной кривой обслуживания для потоков с пересекающимися маршрутами. В случае, когда гарантии QoS нарушаются даже при минимально допустимом уровне качества, контроллер сетевых ресурсов отказывает в резервировании. При освобождении ресурсов, принадлежащих завершившемуся мультимедийному потоку, предложенный алгоритм повышает уровень скорости и качества для потоков, проходящих через разгруженный участок сети.

Введен новый критерий эффективности для оценки методов управления пропускной способностью сетей доступа, называемый абонентской емкостью. Данный критерий позволяет учесть динамические характеристики методов в сетях доступа с переменным числом обслуживаемых мультимедийных сессий. Абонентская емкость  $\bar{k}$  определена как отношение количества обслуживаемых потоков, усредненное за время работы сети  $T$ , к пропускной способности  $B$ :

$$\bar{k} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T N(t) dt}{B},$$

где функция  $N(t)$  равна количеству передаваемых потоков в момент  $t$ .

В работе выполнен расчет абонентской емкости и доли отказов в обслуживании для предложенного метода динамического управления пропускной способностью, а также проведено сравнение с существующими методами - интегрированным и дифференцированным обслуживанием. Расчет проведен для сети абонентского доступа с древовидной топологией, пропускная способность которой задана множеством кривых обслуживания для составляющих ее узлов коммутации. К листьям дерева сети подключены  $N$  абонентов, к вершине дерева - мультимедийный сервер и контроллер сетевых ресурсов. Поток запросов на установление мультимедийной

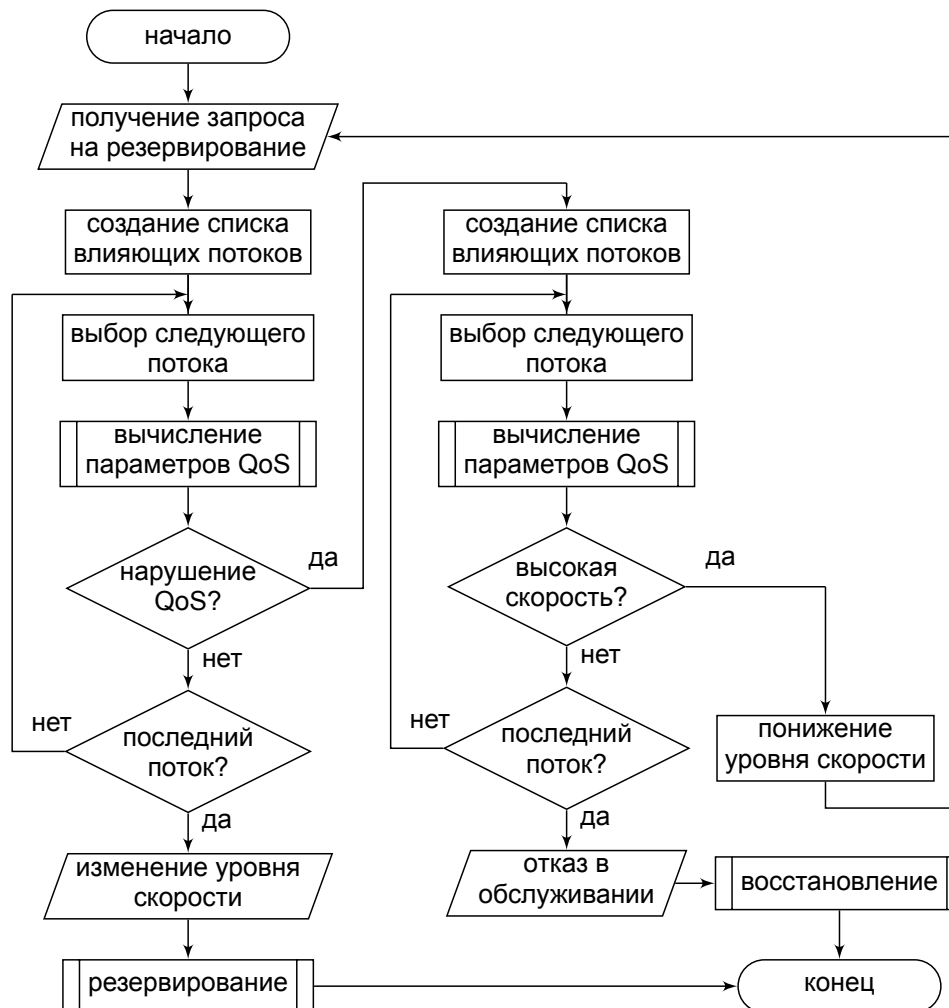


Рис. 8. Алгоритм динамического резервирования сетевых ресурсов

сессии от  $j$ -го абонента задан последовательностью времен подачи запросов  $\{\tau_i^j\}$  и последовательностью длительностей запросов  $\{l_i^j\}$ , где  $i$  - номер запроса. Распределение времен между окончанием обслуживания запроса и передачей следующего запроса подчиняется экспоненциальному закону. Каждый абонентский запрос принимается только в том случае, если при резервировании необходимой пропускной способности не нарушаются гарантии QoS других передаваемых потоков. С помощью предложенного ранее алгоритма резервирования контроллер сетевых ресурсов принимает решение о выполнении запроса, а также осуществляет регулирование скоростей потоков в зависимости от загрузки сети. Абонентская емкость

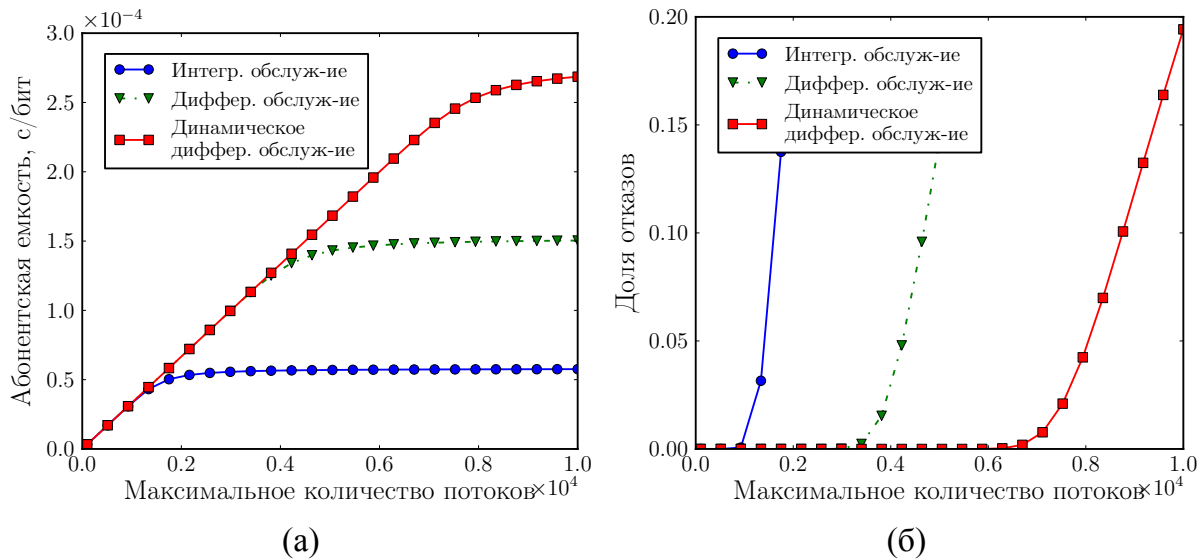


Рис. 9. Сравнение методов динамического управления пропускной способностью: а) абонентская емкость; б) доля отказов в обслуживании

рассчитана по следующей формуле:

$$\bar{k} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_i \sum_j \phi^j(\tau_i^j) \cdot l_i^j}{B},$$

где функция  $\phi^j(t)$  равна единице в те моменты времени, когда производится обслуживание запроса от  $j$ -го абонента и нулю - во все остальные моменты. При расчете использованы регулируемые мультимедийные потоки, представляющие типичные для мультисервисных сетей доступа виды трафика, такие как фильмы, спортивные соревнования, новости и др. Значения PSNR для различных уровней скорости каждого потока находятся в диапазоне 30-40 дБ. Каждый уровень скорости характеризуется динамической кривой поступления. В результате расчетов установлено, что при скоростях передачи коммутаторов сети в диапазоне от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с разработанный метод управления пропускной способностью обеспечивает повышение абонентской емкости на 30-70 процентов и понижение доли отказов на 25-65 процентов по сравнению с существующими методами.

Показано, что при количестве предоставляемых потоков больше 6000 метод динамического дифференцированного обслуживания превосходит по абонентской емкости существующие методы интегрированного и дифференцированного обслуживания в 1.4 раза и 4.4 раза соответственно (рис. 9а). Сравнение по абонентской емкости проведено для нескольких видео-

Видео-поток	Дифференцированное обслуживание		Динамическое дифференцированное обслуживание	
	Доля кадров с нарушением QoS	Абонентская емкость, с/бит $\times 10^{-4}$	Доля кадров с нарушением QoS	Абонентская емкость, с/бит $\times 10^{-4}$
Фильм 1	0.00001	1.5	0.00001	2.2
Фильм 2	0.00001	2.2	0.00002	2.5
Фильм 3	0.00002	1.8	0.00002	2.3
Спорт	0.00002	1.7	0.00001	2.0
Реклама	0.00001	2.1	0.00002	2.5
Музыкальный клип	0.00001	2.2	0.00001	2.6

Таблица 1. Сравнение предложенного метода с методом дифференцированного обслуживания для различных видео-поточков

поточков (Таблица 1), представляющих типичные для мультисервисных сетей виды трафика.

С помощью моделирования в среде ns-3 определено количество нарушений гарантий качества обслуживания. Для этого собрана схема, аналогичная той, что использована во второй главе, и состоящая из модулей BridgeNetDevice, объединенных в древовидную топологию. На вход сети были поданы те же регулируемые мультимедийные потоки, что и при расчете абонентской емкости. При этом была оставлена только та часть потоков, которая была принята к обслуживанию контроллером сетевых ресурсов. Последовательность уровней скорости для каждого потока определена в соответствии с предложенным алгоритмом резервирования. С помощью встроенных трассировщиков ns-3 произведено измерение задержек передачи и длин очереди для каждого мультимедийного потока. Установлено, что при использовании разработанного метода управления пропускной способностью доля пакетов с нарушениями гарантий QoS не превышает установленное допустимое значение.

В четвертой главе разработана методика внедрения динамического дифференцированного обслуживания в существующие мультисервисные сети абонентского доступа. Для этого предложен комплекс дополнений к

существующим проколам сетевого управления, а также разработана программная реализация контроллера сетевых ресурсов в среде NumPy. Областью применения методики являются сети доступа на основе Ethernet-технологий, предоставляющие абонентам IP-телевидение и услугу «видео по запросу». Управление сетью и передача данных осуществляется с помощью IP-протоколов, таких как RTP (Real-time Transport Protocol), IGMP (Internet Group Management Protocol) и RTSP (Real Time Streaming Protocol).

В работе предложено расширение протокола автоматического определения топологии сети LLDP (Link Layer Discovery Protocol), позволяющее определять пропускную способность каждого маршрута в условиях меняющейся структуры сети доступа. Для этого каждый коммутатор сети производит периодическую рассылку LLDP-пакетов, содержащих параметры кривых обслуживания, которые характеризует пропускную способность, предоставляемую каждому классу передаваемого трафика. При изменении топологии контроллер сетевых ресурсов производит сбор этих параметров с помощью протокола сетевого управления SNMP (Simple Network Management Protocol). Расчет кривой обслуживания всего маршрута доставки производится с помощью свойства конкатенации кривой обслуживания.

Разработано расширение протокола резервирования сетевых ресурсов RSVP (Resource Reservation Protocol), необходимое для реализации динамического дифференцированного обслуживания. Запрос на резервирование отправляется мультимедийным сервером при установке соединения с абонентом. Для передачи характеристики регулируемого потока разработан новый формат RSVP-запроса, называемый динамическим дескриптором трафика TDSpec. Данный дескриптор содержит параметры динамической кривой поступления для каждого уровня качества передаваемого потока. RSVP-запрос отправляется контроллеру сетевых ресурсов, который принимает решение о допуске нового потока на основании рассчитанных значений параметров QoS. В случае отказа контроллер сетевых ресурсов отправляет сообщение об ошибке ResvErr мультимедийному серверу, который в свою очередь разрывает соединение с абонентом. Для подтверждения успешного резервирования разработан новый формат RSVP-запроса, называемый дескриптором динамического резервирования RDSpec. Данный дескриптор включает в себя идентификатор уровня качества, позволяющий мультимедийному серверу выбрать для передачи нужный поток. Если для установки нового соединения необходимо освобождение части за-



Рис. 10. Пример оборудования сетей мультисервисного абонентского доступа

нятой пропускной способности, контроллер сетевых ресурсов может понижать качество представления других обслуживаемых потоков с помощью отправки соответствующих дескрипторов RDSpec.

Разработана программная реализация контроллера сетевых ресурсов на языке Python с использованием библиотеки для матричных вычислений NumPy. Программа состоит из двух частей. Первая часть производит расчет параметров динамической кривой поступления для предоставляемых абонентам видео-потоков. Исходными данными для расчета является последовательность времен передачи видео-кадров, последовательность размеров кадров, а также ожидаемая пропускная способность канала передачи данных. Параметры кривой обслуживания выбираются таким образом, чтобы обеспечить как можно большее количество передаваемых потоков при полном заполнении канала. Для этого используется метод, разработанный во второй главе. Первая часть программы может использоваться автономно от сети доступа для формирования дескрипторов TDSpec мультимедийных потоков.

Вторая часть программы осуществляет контроль доступа и регулирование скорости передаваемых мультимедийных потоков. Для этого программа поддерживает базу данных, содержащую информацию о коммутаторах сети доступа, а также об уже установленных мультимедийных сессиях. В качестве входных данных программа принимает дескриптор TDSpec и маршрут передачи некоторого потока. Далее по методу, описанному в главе 3, принимается решение о допуске или недопуске в сеть этого потока и возвращается список соединений, для которых необходимо изменение уровня скорости. Разработанная программа может быть встроена в существующий сервер резервирования, реализующий RSVP или какой-либо другой протокол, для управления сетью доступа через стек протоколов TCP/IP.

Описанная методика была использована при разработке оборудования абонентского доступа для мультисервисных сетей с динамическим дифференцированным обслуживанием (рис. 10). Данное оборудование позволяет предоставлять строгие гарантии качества обслуживания мультимедийного трафика и может применяться в сетях на основе технологий Ethernet, DSL (Digital Subscriber Line) и PON (Passive Optical Network).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена математическая модель для описания регулируемого мультимедийного трафика. Данная модель представляет собой динамическую стохастическую кривую поступления с экспоненциальной ограничивающей функцией. Сформулированы и доказаны свойства модели, позволяющие рассчитывать параметры качества обслуживания, такие как задержка передачи и вероятность переполнения буфера, в многоканальных сетях со статистическим мультиплексированием. С помощью моделирования в среде ns-3 показано, что при передаче типичных для мультисервисных сетей видов мультимедийного трафика (фильмы, новости, спортивные соревнования) через цепочку коммутаторов со скоростями в диапазоне 5 - 1000 Мбит/с предложенная модель трафика обеспечивает уменьшение усредненной ошибки предсказания задержки передачи и длины очереди коммутатора на 20-40 процентов по сравнению с известными моделями.
2. Разработан метод расчета параметров динамической кривой поступления, позволяющий повысить коэффициент использования узлов коммутации со статистическим мультиплексированием. С помощью моделирования в среде ns-3 показано, что для коммутаторов со скоростями передачи от 5 до 1000 Мбит/с и размерами буфера от 500 Кбит до 5 Мбит предложенный метод обеспечивает повышение коэффициента использования на 15-35 процентов по сравнению с методами, используемыми в сетях с интегрированным и дифференцированным обслуживанием.
3. Разработан метод динамического управления пропускной способностью мультисервисных сетей на основе предложенной модели трафика. Данный метод позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов благодаря учету вероятностных и динамических характеристик мультимедийного трафика. С помощью математических



расчетов и моделирования в среде ns-3 показано, что если сеть доступа имеет древовидную топологию со скоростями отдельных коммутаторов от 5 до 1000 Мбит/с и распределение времен между абонентскими запросами подчиняется экспоненциальному закону, то предложенный метод обеспечивает повышение абонентской емкости сети доступа на 20-55 процентов и уменьшение доли отказов в обслуживании на 20-60 процентов по сравнению с существующими методами при допустимой вероятности отказа меньше 0.001.

4. Разработана методика внедрения предложенного метода управления сетевыми ресурсами в мультисервисных сетях доступа на основе Ethernet-технологий и стека сетевых протоколов TCP/IP. Эта методика предполагает введение в архитектуру сети контроллера сетевых ресурсов для динамического управления пропускной способностью, а также внесение необходимых дополнений в существующие протоколы сетевого управления. Разработана программная реализация контроллера сетевых ресурсов на основе библиотеки для научных расчетов SciPy.

## Список литературы

1. Трещановский П.А. Методика расчета коэффициента использования мультисервисных сетей // Инфокоммуникационные технологии. — 2011. — Т. 9, № 3. — С. 47–52.
2. Трещановский П.А. Оптимизация стохастической модели трафика для мультисервисных сетей // Инженерный вестник Дона. — 2011. — № 3. — С. 1–8. — URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/496/>.
3. Трещановский П.А. Методы управления качеством обслуживания в мультисервисных сетях абонентского доступа // Известия высших учебных заведений. Электроника. — 2010. — № 3(83). — С. 68–73.
4. Трещановский П.А. Метод управления ресурсами мультисервисной сети на основе стохастического подхода // Труды 66-ой Всероссийской конференции, посвященной Дню радио. — М.: РНТОРЭС имени А.С. Попова, 2011. — С. 23–25.
5. Трещановский П.А. Метод определения коэффициента использования мультисервисных сетей с интегрированным обслуживанием // Микроэлектроника и информатика - 2011. 18-я Всероссийская межвузовская

- научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. — М.: МИЭТ, 2011. — С. 242.
6. Трещановский П.А. Передача мультимедийного трафика в многоканальных сетях абонентского доступа на основе Ethernet-технологий // Микроэлектроника и информатика - 2010. 17-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. — М.: МИЭТ, 2010. — С. 266.
  7. Трещановский П.А. Организация передачи видео-трафика в сетях абонентского доступа // Радиоэлектроника, Электротехника и энергетика. 16-ая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. — М.: МЭИ, 2010. — С. 180–181.
  8. Трещановский П.А. Стохастический подход к организации многоканального мультисервисного абонентского доступа // Сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию образования МГТУ ГА. — М.: МГТУГА, 2011. — С. 234.
  9. Трещановский П.А. Алгоритмы автоконфигурирования в синхронных последовательных интерфейсах // Микроэлектроника и информатика - 2006. 13-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. — М.: МИЭТ, 2006. — С. 88.
  10. Трещановский П.А. Особенности управления трафиком в мультисервисных сетях // Микроэлектроника и информатика - 2008. 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. — М.: МИЭТ, 2008. — С. 214.
  11. Трещановский П.А. Оптимизация прямого доступа к памяти в сетевых процессорах // Микроэлектроника и информатика - 2009. 16-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. — М.: МИЭТ, 2009. — С. 254.