

**На правах рукописи**

**ДОМБРОВСКИЙ Кирилл Александрович**

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА  
В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ С АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ  
НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

**Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Уфа 2007**

Работа выполнена  
на кафедре электронных вычислительных машин  
Южно-Уральского государственного университета

Научный руководитель      д-р техн. наук, проф.  
**МЕЛЬНИКОВ Андрей Витальевич**

Официальные оппоненты    д-р физ.-мат. наук, проф.  
**ЖИТНИКОВ Владимир Павлович**  
  
канд. техн. наук, доц.  
**ВОХМИНЦЕВ Александр Владиславович**

Ведущая организация        Российский федеральный ядерный центр – Все-  
российский научно-исследовательский институт  
технической физики им. акад. Е. И. Забабахина  
(РФЯЦ–ВНИИТФ) (г. Снежинск)

Защита диссертации состоится « 13 » ноября 2007 г. в 10<sup>00</sup> часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан « 9 » октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

**В. В. Миронов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Характерной тенденцией современного этапа развития компьютерных сетей является принципиальное изменение структуры передаваемого трафика. Анализ статистики агрегированного трафика большинства сетей доступа в Интернет явно показывает высокую долю в нем аудио- и видео- потоков данных. Можно определенно утверждать, что трафик сетей доступа в Интернет, а также сетей крупных предприятий, стал мультимедийным. При этом постоянно разрабатываются и внедряются новые алгоритмы, протоколы и технологии, которые в определенной степени улучшают качество передачи трафика реального времени в IP-сетях. Следствием этого является существенное усложнение архитектуры сетей TCP/IP, которые теперь характеризуется не просто как сети передачи данных, а как мультисервисные.

Все это делает применение аппарата аналитического моделирования для исследования вновь создаваемых алгоритмов и протоколов достаточно сложным, а зачастую и невозможным. Альтернативным подходом являются имитационные модели компьютерных сетей, которые могут быть сколь угодно близки к моделируемой системе. В числе научных школ, внесших серьезный вклад в проблематику разработки имитационных моделей мультисервисных сетей, следует перечислить многие исследовательские центры. В США – это Колумбийский университет (H. Schulzrinne и W. Jiang), Национальная лаборатория им. Лоуренса (S. Floyd) и Калифорнийский университет в г. Беркли (C. Chuah), в Германии – Институт открытых систем FOKUS (H. Sanneck), в Великобритании – Лондонский университет UCL (J. Crowcroft), во Франции – Национальный институт INRIA (J-C. Bolot), в Италии – Политехнический институт в г. Турине (J. C. de Martin), в Финляндии – Технологический университет в г. Хельсинки. Среди отечественных центров, в первую очередь, следует отметить Санкт-Петербургскую научную школу: ЛОНИИС (Б. С. Гольдштейн) и Университет телекоммуникаций им. Бонч-Бруевича, а также ряд исследовательских институтов РАН: Московский институт проблем передачи информации РАН (С. Н. Степанов), Институт проблем информатики РАН (С. Я. Шоргин) и др.

При этом в большинстве существующих сетевых симуляторов создание и внедрение модуля вновь разрабатываемого протокола затрагивает если не всю, то большую часть архитектуры имитационной модели сети, так как возникает необходимость модификации других модулей. Таким образом, при внедрении новых и замены существующих сетевых объектов возникает необходимость изменения концептуальной структуры модели. Как следствие, возникает зависимость между разработчиками, что нежелательно. В этой связи актуальной является задача применения концепции объектно-ориентированного проектирования и анализа для построения имитационной модели мультисервисной сети.

### **Цель работы**

Разработка и реализация объектно-ориентированной имитационной модели мультисервисной сети и создание с ее использованием алгоритма, улучшающе-

го качественные характеристики передачи мультимедийного трафика.

### **Задачи исследования**

В рамках диссертационной работы решались следующие основные задачи:

1. Анализ математических моделей источников основных типов трафика мультисервисных сетей связи.
2. Анализ топологий сетей современных Интернет-провайдеров.
3. Разработка объектно-ориентированной имитационной модели мультисервисной сети.
4. Выбор программного обеспечения для реализации разработанной имитационной модели.
5. Разработка распределенного адаптивного алгоритма IP-маршрутизации с обратной связью и включение его программно реализующего модуля в состав сетевого симулятора.
6. Оценка адекватности разработанной модели с использованием стенда натурального моделирования.
7. Оценка эффективности работы разработанного алгоритма с использованием полученной имитационной модели.

### **Методы исследования**

Основные результаты диссертационной работы получены с использованием положений теории вероятностей, методов имитационного и натурального моделирования, статистического анализа данных, а также методов объектно-ориентированного анализа, проектирования и программирования. Проведён натуральный эксперимент на созданном научно-исследовательском стенде.

### **Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Объектно-ориентированная имитационная модель мультисервисной сети с адаптивной маршрутизацией.
2. Программная реализация предложенной модели на базе пакета имитационного моделирования AnyLogic.
3. Распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации с обратной связью DARL.
4. Интегральная методика оценки эффективности работы системы маршрутизации.

### **Научная новизна результатов**

1. Предложена новая имитационная модель мультисервисной IP-сети с адаптивной маршрутизацией, разработанная и формализованная средствами языка UML. Основным отличием модели является использование объектно-ориентированного подхода для представления составляющих её компонентов и связи между ними. Данный подход обеспечивает архитектурное и функциональное соответствие модели стеку протоколов TCP/IP, простоту внедрения новых и замены существующих классов сетевых объектов без изменения концептуальной структуры модели; возможность независимой работы нескольких исследователей и разработчиков новых сетевых протоколов и алгоритмов; возможность настройки выходных данных модели под задачи исследования.

2. Предложена новая модель сетевой топологии – «многоканальность», которая, как показал анализ сетей Интернет-провайдеров, является наиболее актуальной при моделировании современных сетей передачи данных.

3. Разработан новый распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации DARL, который учитывает особенности типовой топологии Интернет-сетей. Новизна алгоритма заключается в наличии обратной связи между узлами маршрутизации, а также в том, что пакеты данных одновременно являются служебными сообщениями о состоянии каналов и в рамках процедуры маршрутизации учитывается вероятность сброса пакета на том или ином сетевом интерфейсе.

4. Предложена новая интегральная методика, существенно упрощающая сравнительную оценку качества алгоритмов маршрутизации на основе следующих базовых характеристик: производительность системы маршрутизации, стоимость доставки данных, процент потерь, задержка при передаче и джиттер. Новизна методики заключается в том, что оценка производится всего лишь по одному комплексному критерию.

#### **Практическая значимость результатов**

- программная реализация разработанной имитационной модели в среде AnyLogic. Модель позволяет эмулировать сети с произвольными топологиями. Данную модель можно применять как в учебном процессе, так и для исследования работы сети любой организации;

- натурный стенд измерений качественных характеристик мультимедийного трафика для проверки адекватности модели. Данный стенд использовался для получения выборок таких величин как процент потерь трафика, задержка передачи и джиттер. Стенд может применяться в учебных целях и для отладки механизма работы сетевых алгоритмов и протоколов;

- реализация распределенного адаптивного алгоритма маршрутизации с обратной связью DARL в операционной системе Linux на базе пакета Click Modular Router. Экспериментальная проверка эффективности предложенного алгоритма показала, что при его использовании достигается улучшение следующих параметров – потери трафика и производительность системы маршрутизации.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе кафедры ЭВМ Южно-Уральского государственного университета, а также в сети Интернет-провайдера «Интерсвязь» (г. Челябинск). Копии актов внедрения представлены в приложении к диссертационной работе.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- совещании научно-методического совета по информатике при Министерстве образования и науки РФ «Актуальные проблемы информатики в современном российском образовании», Москва, 27–29 июня 2005 г.;

- международной конференции «Computer Science and Information Technologies CSIT'2005», Уфа, 18–21 сентября 2005 г.;

- международной конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование», Москва, 20–22 сентября 2005 г.;
- расширенном заседании кафедры ЭВМ Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, 2 июня 2006 г.;
- всероссийской научной конференции «Математика. Механика. Информатика», Челябинск, 19–22 сентября 2006 г.
- расширенном заседании кафедры СП Челябинского государственного университета, Челябинск, 25 января 2007 г.;
- расширенном заседании кафедры СП Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, 16 марта 2007 г.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том 1 в рецензируемом журнале из списка периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Текст диссертации изложен на 126 листах, включая 114 листов машинописного текста, 36 рисунков, 11 таблиц, список литературы (101 название).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цель работы и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, полученная при внедрении результатов диссертационного исследования.

**Первая глава** посвящена рассмотрению классификации математических моделей компьютерных сетей, актуальности создания объектно-ориентированной имитационной модели (ООИМ) сети ЭВМ, а также актуальности проблемы качественной передачи мультимедийного трафика в современных мультисервисных сетях ТСП/Р.

В первом разделе приводится обобщенная классификация моделей сетей ЭВМ, рассматриваются достоинства и недостатки основных направлений моделирования – имитационного и аналитического. Делается вывод о том, что в настоящее время для моделирования сетей ЭВМ в основном используются имитационные модели, так как получение таких характеристик как процент потерь переданных пакетов с использованием аналитического аппарата невозможно. Отмечаются основной недостаток большинства современных сетевых симуляторов – при создании и внедрении нового модуля разрабатываемого протокола возникает необходимость модификации других модулей, что приводит к зависимости между разработчиками. В этой связи применение концепции объектно-ориентированного проектирования и анализа является хорошим решением для устранения указанных недостатков существующих имитационных моделей сетей ЭВМ.

В рамках подхода объектно-ориентированного анализа и проектирования имитационная модель мультисервисной сети рассматривается как модель сложной системы, включающая компоненты, представленные на рис. 1.



Рис. 1. Имитационная модель мультисервисной сети как модель сложной системы

Во втором разделе анализируется архитектура протоколов мультисервисных сетей. На ее основе делается вывод о том, что трафик реального времени в IP-сетях передается в составе протокольной триады RTP/UDP/IP. Анализируются применяемые в настоящее время критерии эффективности передачи трафика в компьютерных сетях, такие как задержка при передаче пакетов, джиттер и процент потерь переданных пакетов. Делается вывод о том, что текущие архитектуры Интернета не обеспечивают любой формы гарантии качества. К настоящему моменту времени было предложено множество адаптивных методов, которые позволяют сделать приложения реального времени более толерантными к вариациям задержек и потерь пакетов. Несмотря на это практика показывает, что проблема качественной передачи мультимедийного трафика в сетях TCP/IP остается решенной не до конца.

В следующем разделе выделяются и анализируются три решения проблемы качественной передачи мультимедийного трафика на основе уже существующих сетей TCP/IP:

1. Применение технологий управления качеством сервиса QoS.
2. Разработка алгоритмов активного управления очередями сетевых интерфейсов.
3. Разработка алгоритмов IP-маршрутизации путем привлечения дополнительной информации для их работы.

Проводится сравнительный анализ каждого из рассмотренных направлений с приоритетом выбора более простого, и как следствие бюджетного, решения. В

качестве решения проблемы качественной передачи мультимедийного трафика в IP-сетях выбрана разработка нового алгоритма маршрутизации.

Таким образом, в главе показана актуальность разработки объектно-ориентированной имитационной модели мультисервисной сети TCP/IP, которая будет использоваться для апробации разработанного в рамках диссертационной работы алгоритма маршрутизации, улучшающего качественные характеристики прохождения мультимедийного трафика.

**Во второй главе** проведен анализ существующего стандартного алгоритма маршрутизации в Интернет, предложен новый распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации с обратной связью (Distributed Adaptive Routing with Loopback, DARL) и описана его реализация в операционной системе Linux.

Постановка задачи разработки алгоритма маршрутизации DARL выделила его следующие особенности, необходимые для реализации:

1. Адаптивность. Алгоритм осуществляет балансировку трафика на основе показателей «вероятность сброса пакета», количества возвращенных пакетов данных и стоимости маршрута.

2. Наличие механизма обратной связи. Алгоритмы на соседних маршрутизаторах взаимодействуют, обмениваясь служебной информацией, роль которой играют возвращаемые пакеты данных.

Структурно алгоритм DARL можно представить в виде блок-схемы (Рис. 2), которая состоит из следующих логических секций. Секция *BackWard* введена для реализации механизма уведомления о происходящих в сети перегрузках. Данный механизм реализуется путем отсылки пакета с пометкой «обратная пересылка» предыдущему маршрутизатору. Секция *stRules* производит первичный анализ таблицы. Применяются стандартные правила Basic Match и Longest Match. Множество маршрутов-кандидатов, полученное после работы данного правила, используется в дальнейшей работе алгоритма DARL. В секции *Best Metric* происходит выбор маршрута с наилучшей метрикой, которая является многокритериальной. Поэтому необходимо введение двух новых полей в таблицу маршрутизации. Поле «Загруженность» содержит количество пакетов, возвращенных шлюзом на данном маршруте за определенный промежуток времени, для вычисления которого служит значение в поле «Граничное время». Итоговая метрика рассчитывается по следующей формуле:

$$M = \begin{cases} 0, & \text{если } p=1; \\ P + L + C, & \text{если } p < 1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – загруженность сетевого интерфейса маршрута;

$P$  – нормированная загруженность сетевого интерфейса;

$L$  – нормированная загруженность маршрута;

$C$  – нормированная стандартная метрика маршрута.

Значения составляющих формулы (1) изменяются в диапазоне от 0 до 1. Более приоритетным считается большее значение.

Нормированная загруженность сетевого интерфейса рассчитывается по формуле (2).

$$P = 1 - p. \quad (2)$$

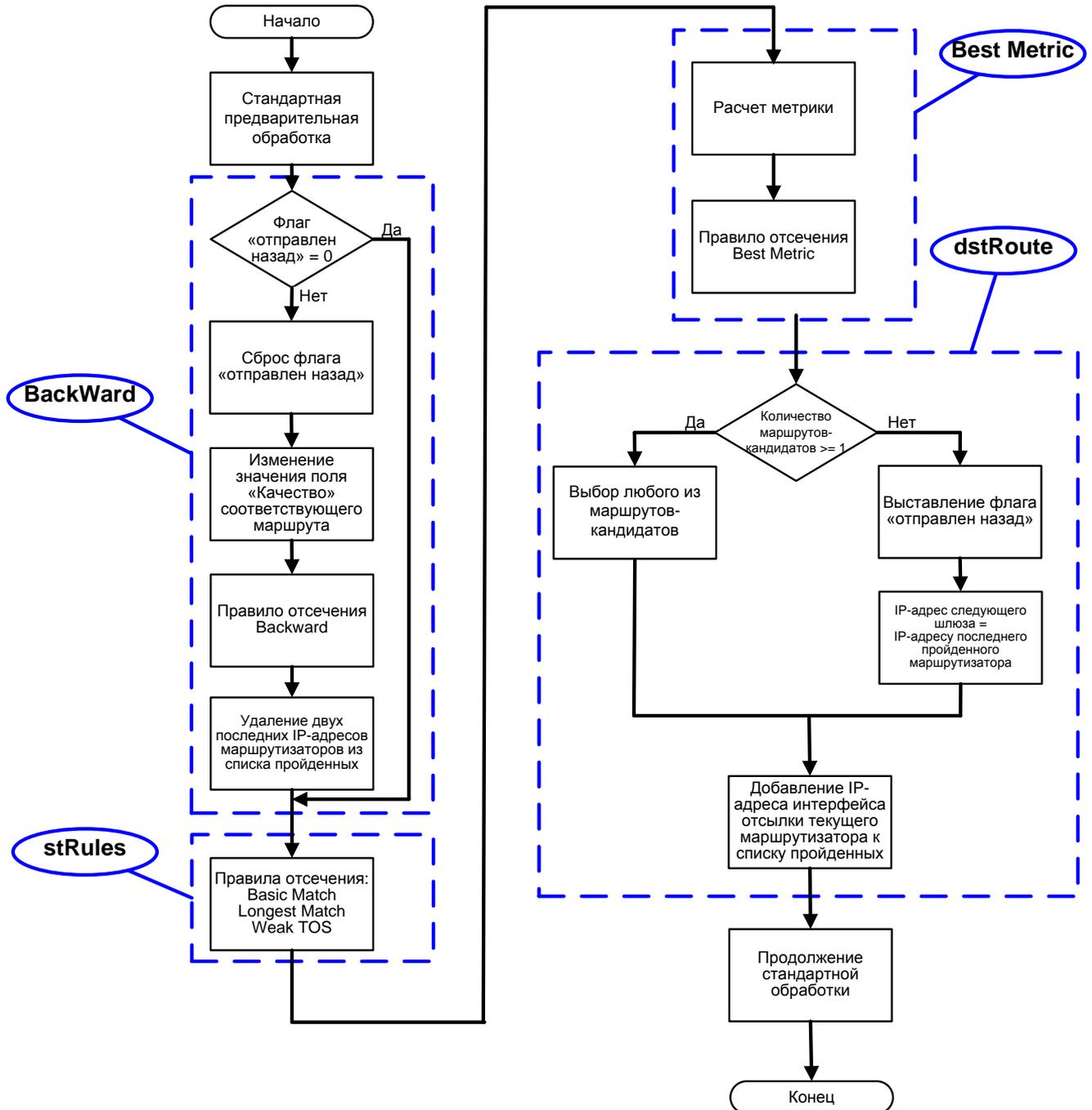


Рис. 2. Схема работы алгоритма маршрутизации DARL

Отдельным вопросом является получения показателя загруженности сетевого интерфейса  $p$ . При этом приоритетные очереди не рассматриваются, и считается, что очередь организована по принципу FIFO с привлечением алгоритма активного управления очередью или без него. В первом случае загруженность очереди определяется вероятностью сброса обрабатываемого пакета, во втором случае – ее длиной: если очередь не достигла лимита, то показатель  $p$  принимается равным 0, иначе – 1.

Нормированная загруженность маршрута рассчитывается по формуле (3).

$$L = \begin{cases} 1, & \text{если } l=0; \\ \frac{1}{l}, & \text{если } l>1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $l$  – загруженность маршрута.

Само значение загруженности маршрута рассчитывается как отношение количества возвращенных пакетов за интервал времени. Количество пакетов берется равным значению поля «Загруженность» таблицы маршрутизации. Временной интервал ( $c$ ) рассчитывается как разность текущего времени и значения поля «Граничное время» таблицы маршрутизации. Интервал, в течение которого осуществляется постоянное инкрементирование поля «Загруженность», принимается равным 0,25 с. По истечении данного таймаута поле «Загруженность» обнуляется, а значение поля «Граничное время» принимается равным текущему времени.

Нормированная стандартная метрика получается по следующей формуле:

$$C = \frac{1}{c}, \quad (4)$$

где  $c$  – метрика стандартного алгоритма.

В секции *dstRoute* наряду с секцией *BackWard* реализуется механизм обратной связи между коммутационными узлами. Если после применения всей цепочки описанных правил множество маршрутов-кандидатов окажется пустым, то пакет необходимо отправить предыдущему маршрутизатору. Иначе продолжить алгоритм стандартной обработки пакета.

В главе доказано, что разработанный алгоритм DARL обладает следующими основными свойствами: дискретность, определенность, конечность, результативность и массовость. С целью практического внедрения полученных в диссертации результатов был выбран вариант реализации в открытой операционной системе Linux, которая широко используется провайдерами Интернет услуг в качестве программного обеспечения узлов маршрутизации. Для этого был выбран пакет *Click Modular Router*.

В главе был разработан оригинальный распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации, улучшающий качественные характеристики мультимедийного трафика, а также показана его практическая реализация в операционной системе Linux.

**Третья глава** посвящена разработке адекватной объектно-ориентированной имитационной модели мультисервисной IP-сети.

В соответствие с рис. 1 выделены и рассмотрены основные составляющие модели:

- логическая структура – модель линии связи, модель сетевого узла и модель сетевой топологии;
- логическое функционирование (функциональная составляющая концептуальной модели) – модель сетевой нагрузки;
- физическая модель.

Логическая структура объектно-ориентированной имитационной модели сети представлена с использованием нотации унифицированного языка модели-

рования UML на рис. 3. Узел полностью представим моделью стека сетевых протоколов, который реализован в классе ProtocolStack и содержит множество протоколов, которые представлены абстрактным классом Protocol. 7-и уровневая эталонная модель ISO/OSI отражена в абстрактных классах Physical, Data-Link, Network, Transport и Application. Последние три уровня модели общепризнано считаются избыточными и представлены классом Application. Далее указываются классы основных протоколов стека TCP/IP, относящиеся к тому или иному уровню. Объединение протоколов в стек указывается через отношение агрегации к классу TCP/IP, который в свою очередь является дочерним по отношению к классу ProtocolStack. Пакеты данных всех протоколов являются дочерними классами по отношению к абстрактному классу Message, который в свою очередь является составляющей класса CALL. Данный класс представляет собой вызов, который производит протокол для осуществления вертикального взаимодействия в рамках стека. Взаимосвязь узла и линии связи указана через отношение ассоциации между классом сетевого интерфейса NIC и классом интерфейса линии связи Connector. Сама линия связи представлена классом Link. Нагрузка на сеть, как функциональная составляющая концептуальной модели, формируется протоколами Прикладного уровня в рамках алгоритма формирования и обработки сообщения, который реализуется процедурой processing().

Произведенный в диссертационной работе анализ показывает, что типовые сетевые топологии не позволяют учесть существенных свойств Интернет сетей. Поэтому для ИМ предложено расширение модели «узкое горло» – модель «многоканальность», которая показана на рис. 4. Условно схема разделена на четыре зоны. На основе проведенного анализа сетей современных Интернет-провайдеров для каждой из зон определены характеристики линий связи.

В ИМ для генерации потока пакетов используются три типа источников трафика: VoIP, HTTP и FTP. Можно с полной уверенностью утверждать, что для моделирования трафика реального времени достаточно источников IP-телефонии, так как весь данный тип трафика работает через протокольную триаду RTP/UDP/IP и имеет одинаковый профиль нагрузки на сеть. HTTP и FTP источники трафика были выбраны как наиболее популярные неинтерактивные сервисы на сегодняшний день.

Модель источника VoIP трафика можно разбить на три подмодели: модель процесса разговора человека, модель выбора голосового кодека, модель потока звонков. Поведение голосового источника традиционно описывается моделью Брэди. Природа любого разговора имеет характер периодического чередования циклов речи и пауз между произносимыми звуками, словами или фразами. При генерации голосовых пакетов эти циклы также присутствуют. При этом ключевыми элементами модели разговора человека являются активная речь (ON-период), паузы (OFF-период) и законы распределения длительности этих периодов. Результаты последних исследований показывают, что ON/OFF периоды распределены согласно законам Парето и Вейбулла. В модели источника VoIP трафика используется кодек сжатия голоса G.729 Annex B. В модели потока звонков определяются законы распределения времени между двумя звонками с одного источника и длительности самого звонка.

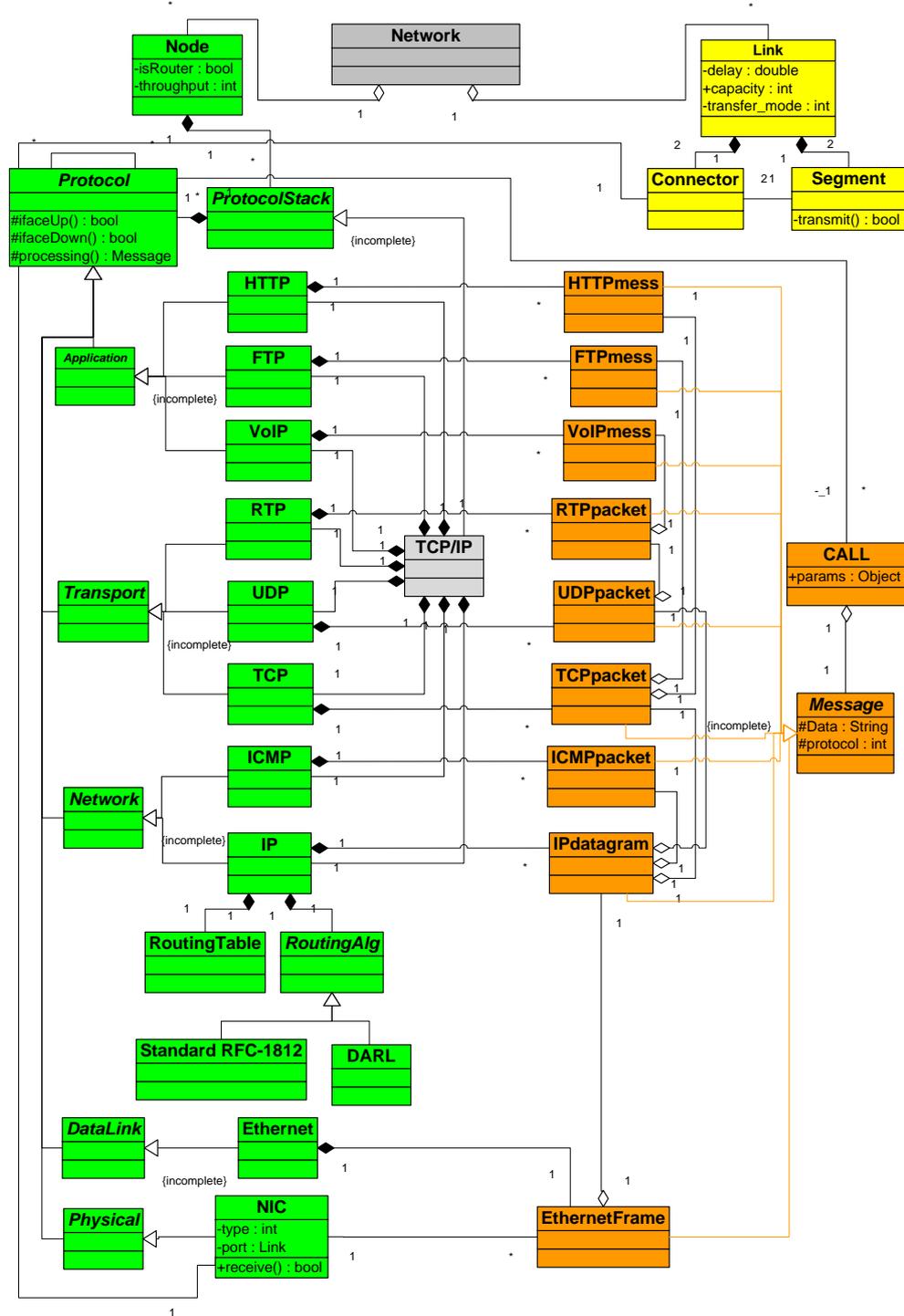


Рис. 3. UML-диаграмма логической структуры имитационной модели мультисервисной сети

Модель источника трафика IP-телефонии представлена на рис. 5. Параметры модели приведены в Таблица 1.

Для определения и описания структурных параметров модели web-трафика используется абстракция web-сеанса, которая включает в себя понятия страницы и объекта. Данная абстракция была предложена в SURGE-модели, которая была взята за основу при эмуляции данного типа трафика. Для определения и описания структурных параметров модели ftp-трафика используется абстракция

ftp-сеанса, которая включает в себя понятие файла.

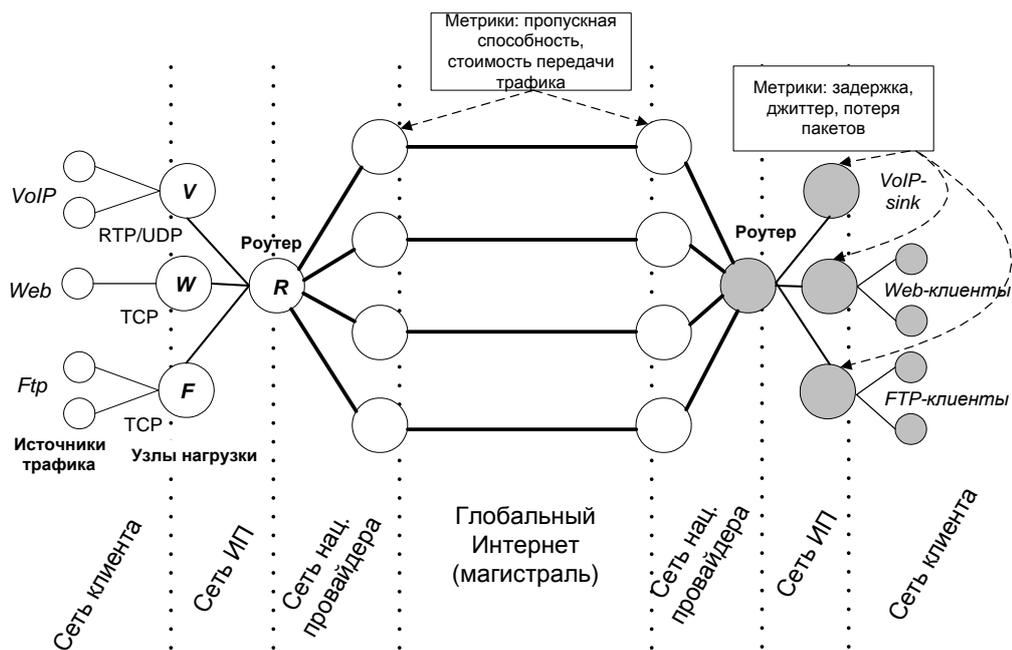


Рис. 4. Модель сетевой топологии «многоканальность»

Таблица 1 – Параметры имитационной модели трафика VoIP

Параметр модели	Функция параметра	Значения
Время ON-периода, $T_{sp}$ .	Распределение	Парето $f(x) = \frac{a * b^a}{x^{a+1}}$ $a = 2,114; b = 0,211$
	Среднее значение, сек	0,4011
	Отклонение, сек	0,3637
Время OFF-периода, $T_{gap}$ .	Распределение	Вейбулла $f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$ $x \geq 0, a > 0, b > 0$
	Среднее значение, сек	0,5775
	Отклонение, сек	1,1774
Длительность разговора, $T_h$ .	Распределение	Экспоненциальное $f(x) = \begin{cases} ae^{-ax}, & x \geq 0, a > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ $a = 0,0029$
	Среднее значение, сек	345,4
Интервал между звонками, $T_a$ .	Распределение	Экспоненциальное, $a = 0,275$
	Среднее значение, сек	3,64
Кодек	Тип	G.729 Annex B
	Длина пакета, байт	20
	Межпакетный интервал, $T_i$ , мс.	10

Количественные и временные характеристики сеанса, также как и в случае с голосовым и web- трафиком, определяются с помощью статистических вероятностных распределений и взяты из спецификации IEEE 802.20.

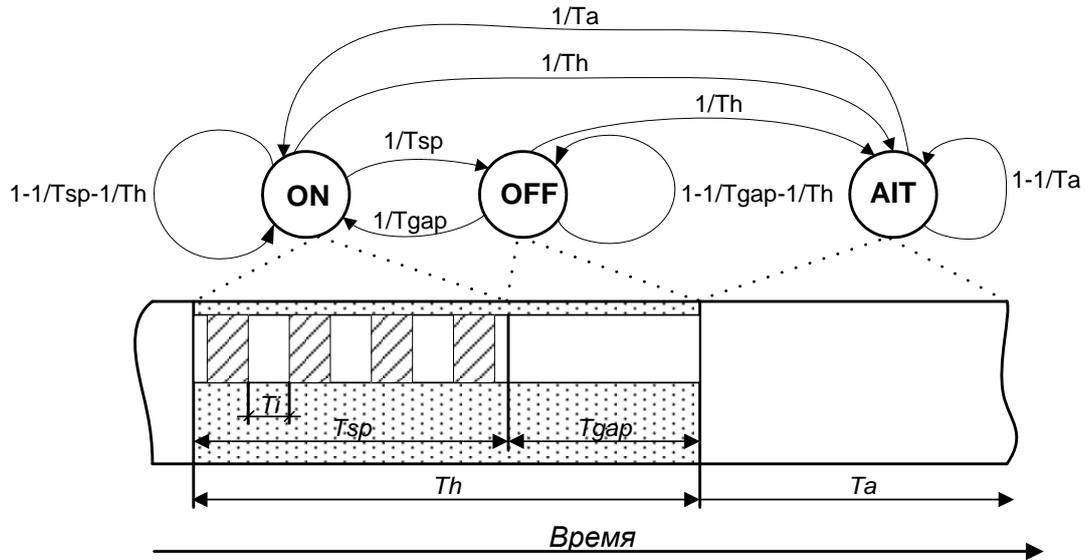


Рис. 5. Модель источника VoIP трафика

Для программной реализации разработанной модели выбран пакет AnyLogic. Была произведена оценка адекватности ИМ на основе результатов, полученных с использованием стенда натурального моделирования. Используя критерий Вилкоксона, был произведен сравнительный анализ выборок, полученных в ходе натурального и имитационного эксперимента. Результаты расчетов свидетельствуют об адекватности разработанной имитационной модели.

**В четвертой главе** произведен анализ эффективности работы алгоритма DARL с использованием разработанной аналитической оценочной модели и объектно-ориентированной имитационной модели мультисервисной сети.

В рамках диссертационной работы известная аналитическая методика оценки эффективности работы маршрутизаторов была развита и на ее основе получена аналитическая модель оценки эффективности работы алгоритмов IP-маршрутизации, с помощью которой были получены выражения оценочных функций алгоритма DARL и стандартного алгоритма IP-маршрутизации:

$$F(\Omega_R \times \Omega_S)_{DARL} = \left[ \frac{2 * S_{BACK} + \left( C_{ACK} - \frac{S_F}{S_W} \right) * S_{ACK} + S_{TR} - S_F}{V_C} + T_{PP\_DARL} \right]^{-1} \cdot \quad (5)$$

$$F(\Omega_R \times \Omega_S)_{STAND} = \left[ \frac{\left( C_{ACK} - \frac{S_F}{S_W} \right) * S_{ACK} + S_{TR} - S_F}{V_C} + T_{PP\_STAND} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $F(\Omega_R \times \Omega_S)_{DARL}$  – оценочная функция алгоритма DARL;

$F(\Omega_R \times \Omega_S)_{STAND}$  – оценочная функция стандартного алгоритма;

$S_{BACK}$  – размер возвращенных пакетов;  
 $C_{ACK}$  – количество переданных сообщений-квитанций;  
 $S_F$  – размер сообщения Прикладного уровня (бит);  
 $S_w$  – размер окна TCP-протокола (бит);  
 $S_{ACK}$  – размер пакета подтверждения (бит);  
 $S_{TR}$  – размер переданных данных (бит);  
 $T_{PP}$  – время выполнения алгоритма маршрутизатором;  
 $Vc$  – скорость самого медленного канала сети (бит/сек).

Используя полученные оценочные функции, был сделан следующий вывод – применение алгоритма DARL является целесообразным только на топологиях типа «многоканальность».

Разработана интегральная методика оценки качества передачи трафика при использовании определенной системы маршрутизации, в которой итоговый показатель качества получается как сумма нормированных математических ожиданий характеристик трафика по приведенной ниже формуле:

$$QoR = k1 * \left( \frac{P_{\max} - \bar{P}}{P_{\max}} \right) + k2 * \frac{D_{\min}}{D} + k3 * \frac{J_{\min}}{J} + k4 * \frac{C_{\min}}{C} + k5 * \frac{\bar{B}}{B_{\max}}, \quad (7)$$

где  $QoR$  – интегральный показатель качества;

$\bar{P}$  – математическое ожидание процента потерь;

$P_{\max}$  – максимальный процент потерь пакетов;

$\bar{D}$  – математическое ожидание односторонней задержки передачи данных;

$D_{\min}$  – минимальная задержка в данной сети;

$\bar{J}$  – математическое ожидание джиттера;

$J_{\min}$  – минимальный джиттер в данной сети;

$\bar{C}$  – математическое ожидание стоимости передачи данных;

$C_{\min}$  – стоимость передачи по самому дешевому каналу;

$\bar{B}$  – математическое ожидание производительности системы маршрутизации;

$B_{\max}$  – пропускная способность самого быстрого канала сети;

$k1, k2, k3, k4, k5$  – весовые коэффициенты.

В формуле (7) каждая составляющая варьируется в диапазоне от 0 до 1. При этом для того, чтобы интегральный показатель качества варьировался в том же диапазоне, необходимо соблюдать следующее требование:

$$\sum_{i=1}^5 k_i = 1. \quad (8)$$

С использованием разработанной имитационной модели произведены эксперименты с постепенным увеличением нагрузки на сеть. При этом соблюдалось следующее соотношение типов трафика – Web  $\approx 70\%$ , VoIP  $\approx 25\%$  и FTP  $\approx 5\%$ . В каждом из экспериментов моделировалась работа сети в течение 1 часа (Таблица 2). Из таблицы 2 видно, что алгоритм DARL превосходит стандартный алгоритм по потерям любого типа трафика вне зависимости от загруженности сети. При этом значения задержки и джиттера зависят от нагрузки на сеть. Увеличение параметров задержки и джиттера при увеличении нагрузки на

сеть является не существенным. В частности джиттер можно компенсировать, организовав буфер на принимающей стороне, что и делается современными протоколами связи в реальном времени.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования

СМ	VoIP трафик			HTTP трафик		FTP трафик		Производительность СМ, пакет/сек	Стоимость доставки данных, у.е./пакет
	Потери, %	Задержка, Мс	Джиттер, мс	Потери, %	Задержка, мс	Потери, %	Задержка, мс		
<b>Нагрузка 20%</b>									
Станд.	0	130,03	4,35	0	141,14	0	142,49	287,96	58,35
DARL	0	125,17	2,08	0	134,21	0	138,57	283,94	56,75
<b>Нагрузка 35%</b>									
Станд.	1,90	136,9	5,00	19,3	151,1	0	140,9	420,7	64,30
DARL	0	125,46	2,35	0	141,57	0	138,30	478,2	62,90
<b>Нагрузка 50%</b>									
Станд.	4,47	137,31	4,39	24,61	157,67	0	138,72	535,68	68,72
DARL	0	137,34	5,63	3,35	161,01	0	146,59	671,90	70,97
<b>Нагрузка 65%</b>									
Станд.	6,07	129,82	4,17	44,27	143,19	1,33	149,47	754,73	73,93
DARL	0	137,94	7,07	6,06	150,10	0	151,54	836,41	76,23
<b>Нагрузка 80%</b>									
Станд.	9,26	128,44	3,94	86,65	156,51	2,00	153,68	757,03	75,74
DARL	0	131,46	4,93	7,62	167,99	0,11	151,64	856,60	77,16

При резком росте входящего трафика и возникновении перегрузки стандартный алгоритм, не обладая возможностью балансировки трафика, вынужден сбрасывать часть пакетов. Наоборот, в аналогичной ситуации (Рис. 6, а) алгоритм DARL на граничном маршрутизаторе перенаправляет часть входящих пакетов в более дорогой канал (10 Мбит/с) и тем самым снижает потери пакетов. Также ниже (Рис. 6, б) показана утилизация каналов исходящего трафика.

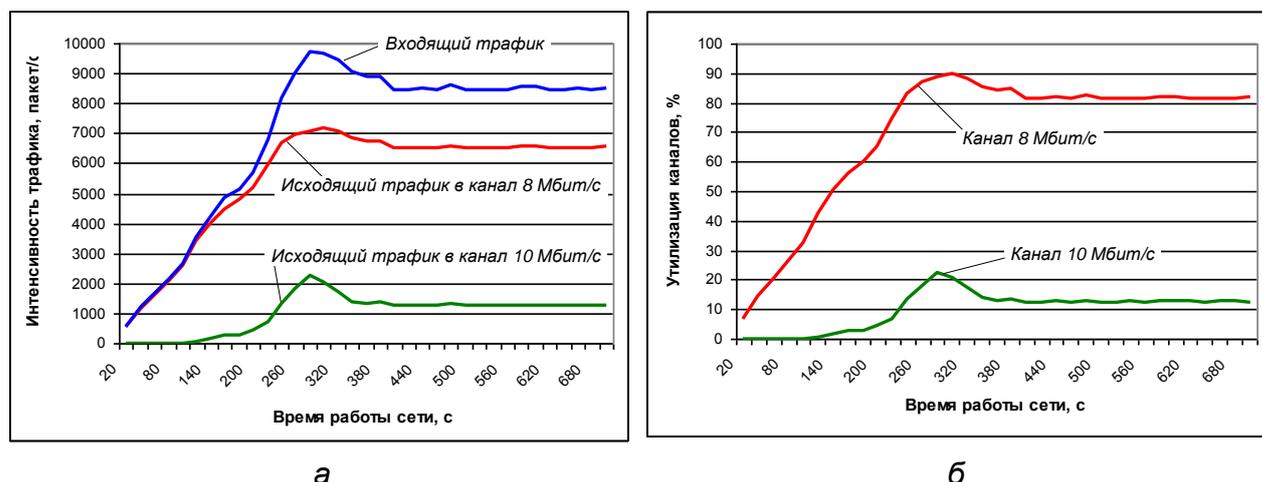


Рис. 6. Эффективность работы алгоритма DARL (а – балансировка трафика при 80% нагрузке на сеть, б – утилизация каналов исходящего трафика при 80% нагрузке на сеть)

Произведена сравнительная оценка стандартного алгоритма маршрутизации и DARL на основе интегрального показателя качества при одинаковой значимости всех исходных величин. В среднем прирост показателя качества при использовании алгоритма DARL составляет 0,2. Таким образом, использование

распределенного адаптивного алгоритма маршрутизации с обратной связью DARL дает следующие преимущества:

1. Значительное уменьшение потерь любого типа трафика.
2. Как следствие, увеличение производительности системы маршрутизации.
3. Улучшение параметров задержки и джиттера при низкой загруженности сети.

Недостатками разработанного алгоритма являются незначительное увеличение задержки передачи данных и джиттера при высокой нагрузке на сеть.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Имитационная модель мультисервисной IP-сети с адаптивной маршрутизацией, основанная на использовании объектно-ориентированного подхода для представления составляющих компонентов модели и связи между ними, что обеспечивает архитектурное и функциональное соответствие модели стеку протоколов TCP/IP, простоту внедрения новых и замены существующих классов сетевых объектов без изменения концептуальной структуры модели; возможность независимой работы нескольких исследователей и разработчиков новых сетевых протоколов и алгоритмов; возможность настройки выходных данных модели под задачи исследования.

2. Распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации с обратной связью DARL, базирующийся на использовании механизма обратной связи коммутационных узлов и отличающийся тем, что с целью выбора одного из альтернативных маршрутов доставки данных вычисляются комплексные метрики, при расчете значений которых учитывается показатель «вероятность сброса пакета» на том или ином сетевом интерфейсе.

3. Программная реализация алгоритма DARL в операционной системе Linux, основанная на использовании пакета Click Modular Router, что позволило провести анализ адекватности разработанной имитационной модели мультисервисной IP-сети в рамках стенда натурального моделирования и использовать полученные результаты для её усовершенствования.

4. Программная реализация имитационной модели мультисервисной IP-сети в среде AnyLogic, основанная на применении подхода агентного моделирования, что позволило провести анализ разработанного алгоритма маршрутизации DARL и использовать полученные результаты для его модернизации.

5. Аналитическая модель оценки эффективности работы алгоритмов IP-маршрутизации, основанная на использовании оценочных функций и позволяющая сравнить несколько алгоритмов маршрутизации без проведения вычислительных экспериментов.

6. Интегральная методика оценки качества алгоритмов маршрутизации, отличающаяся тем, что с целью сравнительной оценки качества прохождения мультимедийного трафика при использовании того или иного алгоритма используется всего один комплексный показатель, при формировании которого можно задавать приоритет компонент, использующихся при его расчете: производительность системы маршрутизации, стоимость доставки данных, процент потерь, задержка при передаче и джиттер.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*****В периодических изданиях из списка ВАК:***

1. Объектно-ориентированная имитационная модель мультисервисной IP-сети / А.В. Мельников, К.А. Домбровский // Программные продукты и системы. 2007. № 2. С. 51–55.

***В других изданиях:***

2. Методы улучшения качества передачи мультимедийного трафика в современных сетях / К.А. Домбровский // Современные информационные технологии – 2004 : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГТУ, 2004. С. 161–162.

3. Обработка результатов имитационного моделирования и оценка адекватности модели / К.А. Домбровский // Современные информационные технологии – 2004 : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГТУ, 2004. С. 73–75.

4. Метод повышения качества сервиса сетей передачи данных для дистанционного образования / А.В. Мельников, К.А. Домбровский // Актуальные проблемы информатики в современном российском образовании : тр. 2-го совещ. науч.-метод. совета по информатике. М. : Макс Пресс, 2005. С. 293–300.

5. Метод повышения качества сервиса мультисервисных сетей / А.В. Мельников, К.А. Домбровский // Компьютерные науки и информационные технологии : тр. 7-го Междунар. сем. (CSIT'2005). Уфа: Изд-во Уфимс. гос. авиац. техн. ун-та, 2005. Т. 3 С. 173–176. (англ. язык).

6. Имитационное моделирование мультисервисных сетей передачи данных / К.А. Домбровский // Информационные технологии в образовании : сб. тр. 1-й междунар. науч.-практ. конф. (ITE'2005). М. : Макс Пресс, 2005. С. 540–545.

7. Распределенный адаптивный алгоритм IP-маршрутизации с обратной связью / А.В. Мельников, К.А. Домбровский // МИТС-НАУКА : междунар. науч. вестник : сетевое электронное научное издание. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУ, 2006. №4. Иден. номер 0420600032/0047.

8. Адаптивный метод динамической IP-маршрутизации с обратной связью / И.Л. Кафтанников, К.А. Домбровский // Известия Челяб. науч. центра УрО РАН. 2007. № 1. <http://csc.ac.ru/ej/file/3777>.

9. Объектно-ориентированная имитационная модель мультисервисной IP-сети / А.В. Мельников, К.А. Домбровский // Компьютерные науки и информационные технологии : тр. 9-го Междунар. сем. (CSIT'2007). Уфа : Изд-во Уфимс. гос. авиац. техн. ун-та, 2007. Т. 1. С. 110–115. (англ. язык).

Диссертант

**Домбровский К. А.**

ДОМБРОВСКИЙ Кирилл Александрович

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА  
В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ С АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ  
НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано к печати 08.10.2007. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 522

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12