

на правах рукописи

ОСИН Андрей Владимирович

**ВЛИЯНИЕ САМОПОДОБНОСТИ РЕЧЕВОГО
ТРАФИКА НА КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника и радиотехнические системы»
Московского государственного университета сервиса

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
ШЕЛУХИН Олег Иванович

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук
ПОТАПОВ Александр Алексеевич
– кандидат технических наук
ТОМАШЕВСКИЙ Алексей Иосифович

Ведущая организация – ФГУП НИИ «Платан» с заводом при НИИ
(г. Фрязино, М/О)

Защита состоится 10 ноября 2005 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.157.05 при Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 17, аудитория А-402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Учёный совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «05» октября 2005 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

КУРОЧКИНА Т.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На рынке телекоммуникационных услуг речевые сервисы занимают одно из лидирующих мест, и с каждым годом число пользователей подобными услугами возрастает. Последнее время наблюдается стремительное развитие телекоммуникационных систем (ТС) с пакетной коммутацией, а также интеграция речевых сервисов в IP-сети.

Особенности пакетной коммутации диктуют необходимость пересмотра традиционных подходов к анализу и синтезу ТС с использованием традиционной теории телетрафика и теории массового обслуживания. При рассмотрении систем пакетной передачи речи обнаруживаются новые особенности и характеристики качества обслуживания, которых лишена традиционная телефония. Появляются новые возможности, связанные, например, с подавлением пауз (VAD – Voice Activity Detection) в речи и использованием освободившегося сетевого ресурса. Механизмы VAD, реализованные в большинстве производимого на сегодняшний день телекоммуникационного оборудования для пакетных сетей с интеграцией речевых сервисов, еще больше усложняют динамику потоков трафика в ТС. Все это влечет за собой появление новых методик расчета, проектирования и моделирования ТС с пакетной передачей речи.

Особую значимость в практике проектирования речевых сервисов имеют адекватные модели речевого трафика как отдельного источника, так и мультиплексированных потоков.

В России "фрактальное" направление в радиофизике и радиотехнике впервые получило широкое развитие в Институте радиотехники и электроники РАН (работы д.ф.-м.н. А.А. Потапова с коллегами) с целью создания новых прорывных информационных технологий с использованием *текстурных* (80-е гг. XX в.) и *фрактальных* (90-е гг. XX в.) мер на основе принципов *нелинейной динамики*. На основе данных исследований в ИРЭ РАН развивается новое фундаментальное научное направление — *применение теории динамических систем и фрактальной топологии в задачах повышения информативности радиосистем различного назначения*.

Аналогичные задачи возникают при решении проблем использования хаоса для кодирования и передачи информации. Среди работ отечественных

ученых следует выделить труды А.С. Дмитриева, А.И. Панаса, М.В. Капранова, В.Н. Кулешова, Н.Н. Удалова, Б.С. Цибакова.

Опыт, накопленный после проведения многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, проводимых как российскими, так и зарубежными учеными, позволяет рассмотреть проблему применимости фрактальных подходов к изучению трафика передачи речи.

Последние исследования демонстрируют, что телекоммуникационный трафик для большинства видов сервисов является самоподобным (фрактальным). Известно множество как экспериментальных, так и теоретических исследований в этой области, однако очень небольшое число работ посвящено исследованию фрактальной природы трафика речевых сервисов. Исследования показывают, что подобными свойствами обладает и речевой трафик.

На сегодняшний день нет систематизированных исследований воздействия самоподобных свойств речевого трафика на качество обслуживания абонентов. Исследование данной проблемы представляется важным, поскольку при наличии самоподобного трафика в системах передачи речи качество обслуживания (QoS – Quality of Service), как правило, ухудшается по сравнению с тем, что наблюдалось бы, например, в случае пуассоновского трафика.

Учет самоподобных (фрактальных) свойств трафика позволит более точно описать и воспроизвести речевой трафик, что, в свою очередь, обеспечит возможность получения показателей QoS, соответствующих реально наблюдаемым.

Поэтому актуальными представляются исследования свойств самоподобности речевого трафика, их влияния на характеристики QoS в ТС и оптимизация входных параметров ТС с целью обеспечения заданного QoS.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является исследование свойств самоподобности речевого трафика, оценка их влияния на характеристики качества обслуживания и оптимизация входных параметров ТС с целью обеспечения заданного QoS.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- а) разработка специализированного программного обеспечения и проведение комплекса экспериментальных исследований трафика в ТС с целью

оценки статистических и фрактальных характеристик речевого трафика для различных видов речевых кодеков;

- б) разработка аналитических и численных моделей и их сравнительный анализ с целью адекватного описания и имитационного моделирования речевого трафика VoIP с учетом самоподобных свойств для различных видов кодеков (формы G.711 и гибридных: G.728, G.729, G.723.1), использующих VAD;
- в) разработка вычислительных алгоритмов и реализующего их ПО с целью численной оценки выходных характеристик QoS телекоммуникационных сетей в условиях самоподобности речевого трафика в различных сетевых окружениях (на примере узла сети Frame Relay и IP-сети);
- г) разработка алгоритмов и ПО численной оптимизации входных параметров ТС с целью обеспечения QoS и оценки влияния самоподобности речевого трафика на параметры качества обслуживания.

Методы исследования. Для решения перечисленных задач в работе использованы методы статистической обработки данных, теории массового обслуживания, теории цепей Маркова (ЦМ) и имитационного моделирования на ПЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) количественные и качественные результаты статистического анализа трафика в реально функционирующей системе VoIP с учетом самоподобности речевого трафика;
- 2) методика аппроксимации речевого трафика на выходе кодеков G.711, G.728, G.729 и G.723.1 при помощи марковских и фрактальных моделей, параметры которых оцениваются на основе статистических характеристик измерений реального трафика, и сравнительный анализ результатов аппроксимации;
- 3) алгоритмы, ПО и полученные в результате имитационного моделирования выходные характеристики QoS узла системы Frame Relay и IP-сети в условиях самоподобного трафика;
- 4) алгоритмы, ПО и результаты оптимизации входных параметров ТС с целью обеспечения QoS, а также оценка влияния параметров самоподобности речевого трафика на результаты оптимизации.

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Разработаны алгоритмы, специализированное ПО, а также получены результаты экспериментальных исследований статистических и фрактальных характеристик трафика в крупномасштабных ТС, показывающие, что трафик речевых сервисов обладает самоподобными (фрактальными) свойствами.
2. Разработаны и реализованы численными и аналитическими методами марковские и фрактальные модели речевого трафика VoIP как на уровне соединений, так и на пакетном уровне при использовании кодеков G.711, G.728, G.729, G.723.1 и механизма VAD, параметры которых определяются из статистических характеристик реального трафика ТС.
3. Разработан алгоритм, ПО и получены численные результаты анализа влияния самоподобности речевого трафика на характеристики QoS телекоммуникационной сети.
4. Разработан алгоритм, ПО и проведена численная оптимизация входных параметров ТС с целью обеспечения заданных параметров QoS в условиях самоподобного речевого трафика; оценено влияние степени самоподобности сетевого трафика на результаты оптимизации.

Практическая ценность работы и ее реализация. Результаты, полученные в данной диссертационной работе, могут быть использованы при проектировании речевых сервисов в телекоммуникационных системах. Разработанное программное обеспечение может применяться как в практике специалистов в области телекоммуникаций, так и в научных и учебных целях.

Материалы работы использованы в НИР ГОУ ВПО МГУС № 01.04.04 (РН ВНИТЦ №0120.0.404696, 2004 г.) «Исследование и разработка цифровых методов сбора, обработки и передачи данных на всех уровнях автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии».

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Комплексные телекоммуникационные услуги» при анализе эффективности телекоммуникационной сети, о чем свидетельствует соответствующий акт.

Работа внедрена в учебный процесс кафедры «Радиотехника и радиотехнические системы» МГУС в курсе «Моделирование радиотехнических систем» и кафедры «Информационные системы» в курсе «Моделирование информационных систем».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 58-ой Научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова в 2003 г., X-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ в 2004 г., XXXVI-ой научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава МТУСИ в 2003 г., научной конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ в 2004 г., III-ей Международной конференции «Индустрия сервиса в XXI веке» в 2001 г., IV-ой Международной конференции «Индустрия сервиса в XXI веке» в 2002 г., V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» в 2004 г.

По теме диссертации автором опубликовано 18 печатных работ (7 из них выполнены без соавторов), в том числе одна монография («Фрактальные процессы в телекоммуникациях») и одно учебное пособие («Моделирование информационных систем»).

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены в 2-х томах. Первый том содержит 164 страницы и состоит из введения, 4-х глав, заключения, включает 125 иллюстраций и 93 наименования списка литературы. Второй том содержит 102 страницы и состоит из 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, формулируются цель и задачи, решаемые для достижения поставленной цели.

В **Главе 1** даны основные теоретические сведения о самоподобных процессах. Показано широкое распространение явления самоподобности для описания статистических характеристик трафика в ТС.

Здесь же приводятся основные сведения о QoS в ТС, определяются основные показатели QoS, а также дана классификация основных типов трафика.

Поскольку явление самоподобности в системах пакетной передачи речи возникает вследствие агрегирования сегментированных на активные (ON) и пассивные (OFF) участки речевых потоков, то дается краткое описание некоторых наиболее распространенных методов сегментации речевых сигналов. В заключительном разделе главы излагается постановка задачи исследования.

В Главе 2 описываются оригинальные результаты экспериментальных исследований трафика в крупной корпоративной ТС.

На основе результатов статистического анализа экспериментально полученного (на интервале недели) трафика в ТС показано, что суммарный трафик обладает существенными самоподобными свойствами, а также является долго-временно зависимым случайным процессом. Это целесообразно учитывать при оптимизации ТС. По результатам статистического анализа экспериментально полученного трафика разработана модель, содержащая две, в общем случае нестационарные, компоненты. Первая обусловлена трафиком на уровне вызовов на больших (минутных и часовых) интервалах времени и описывает периодические структуры ежедневных нагрузок, обычно наблюдаемых в магистральных каналах. Вторая компонента присутствует только на малых (секундных и минутных) масштабах времени и имеет долговременный характер, постепенно исчезая с увеличением масштаба.

Первая составляющая модели раскладывается на два случайных процесса: длительностей вызовов и интервалов между поступлениями вызовов. Реализация и гистограмма для этих двух случайных процессов показаны на рис. 1.

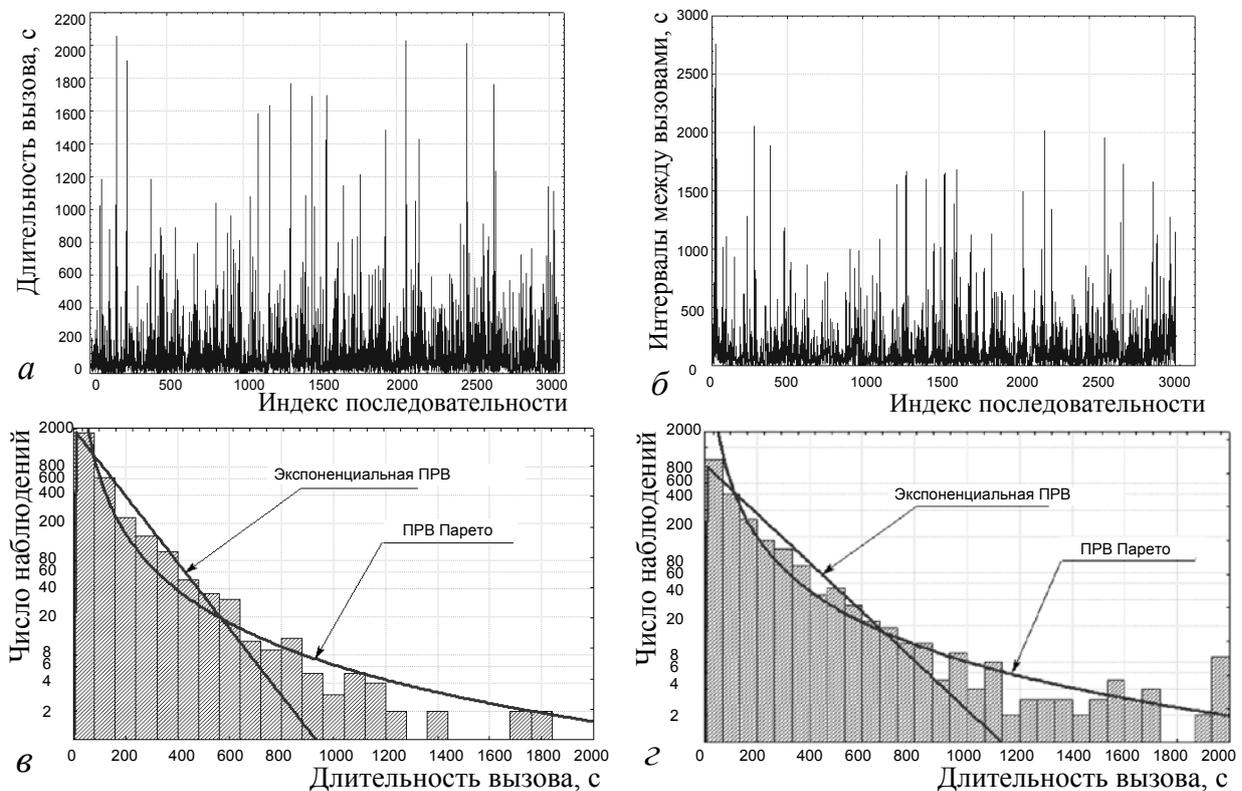


Рис. 1. Составляющие трафика на уровне вызовов: *а* – длительности вызовов; *б* – интервалы между поступлениями вызовов; *в* – гистограмма длительностей вызовов; *г* – гистограмма интервалов между поступлениями вызовов

Анализ полученных статистических характеристик показывает, что распределения процессов длительностей вызовов (рис. 1, в), а также интервалов между поступлениями вызовов (рис. 1, з) существенно отличаются от экспоненциального, и хорошо описываются распределениями, имеющими «тяжелые хвосты», в частности, распределением Парето ($w(x) = ab^\alpha/x^{\alpha+1}$ для $x \geq b$, где α – параметр формы; b – параметр масштаба). Эта информация, как правило, игнорировалась при классическом анализе агрегированного речевого трафика. Вторая составляющая речевого трафика в системе отражает пакетную структуру поступлений. Пример подобного процесса, полученного при измерениях, представлен на рис. 2.

С помощью разработанного ПО в главе проведен анализ статистических характеристик мультиплексированного речевого трафика при вариации числа речевых источников от 10 до 111. Кодирование речевой информации осуществлялось при помощи кодека G.711, на выходе которого пакеты упаковывались в IP-пакеты.

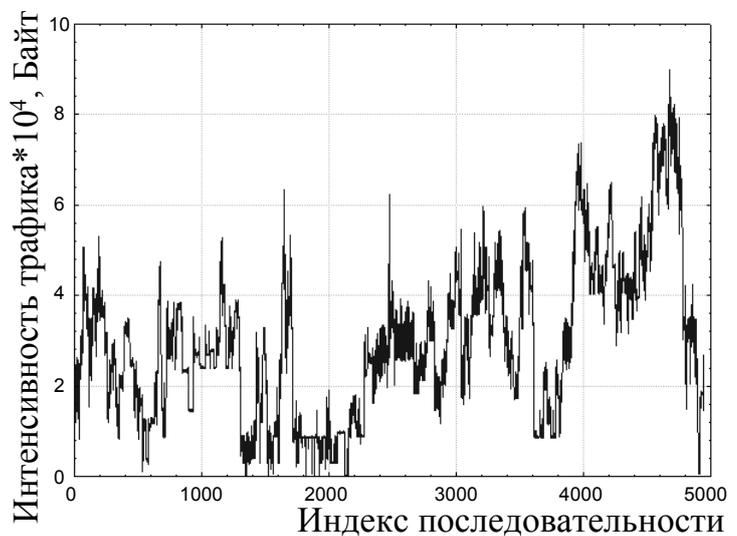


Рис. 2. Реализация трафика на пакетном уровне

Для имитации VAD-алгоритмов в системах передачи речи использовалась сегментация речевых сигналов с помощью комбинированного алгоритма разделения участков речи на ON/OFF-периоды.

Анализ статистических характеристик показал, что при числе мультиплексируемых речевых источников более 20 обрабатываемые потоки можно считать стационарными в широком смысле. Оценки мультиплексированного трафика с использованием методов R/S-статистики и изменения дисперсии выявили, что значения показателя Херста H лежат в интервале 0,75 – 0,95.

В Главе 3 основное внимание уделяется разработке самоподобных, марковских и полумарковских моделей, описывающих динамику трафика речевых источников как на уровне вызовов, так и на пакетном уровне. Проведено сравнение статистических характеристик искусственных профилей трафика, полученных с

применением моделей, и реальных профилей речевого трафика. Рассматривались как кодеки формы G.711, так и гибридные кодеки G.723.1, G.728, G.729.

На примере кодеков G.711 и G.728 излагается подход к моделированию отдельного речевого источника на основе цепей Маркова. Сравнительный анализ дополнительных функций распределения (ДФР) длительностей ON- и OFF-периодов речевых потоков на выходе кодека показывает, что распределения процессов относятся к классу распределений с «тяжелыми хвостами», причем распределение длительностей OFF-периодов имеет значительно более тяжелый хвост, чем ON. Это свидетельствует о том, что в записи реализации речи присутствовали интервалы пауз гораздо бóльшие, чем интервалы активностей. Для оценки числа состояний цепи Маркова, аппроксимирующей процессы ON- и OFF-периодов, разработана специальная методика, предполагающая аппроксимацию дополнительных функций распределения реальных процессов с помощью суммы экспоненциальных функций. Найдено, что аппроксимация ДФР длительностей ON-периодов имеет вид $L_A(n) = \sum_{i=1}^4 A_i e^{\alpha_i n}; \sum_i A_i = 1$. Аналогично для длительностей OFF-периодов $L_{II}(n) = \sum_{i=1}^4 B_i e^{\beta_i n}; \sum_i B_i = 1$. Параметры ДФР $A_i, B_i, \alpha_i, \beta_i, i = 1, 2, 3, 4$ оцениваются по результатам статистической обработки экспериментальных данных.

В соответствии с разработанной методикой, наличие четырёх членов в выражениях аппроксимирующих ДФР ON-периодов и четырёх членов в ДФР OFF-периодов свидетельствует о том, что суммарный ON/OFF-процесс может быть представлен в виде ЦМ с восемью состояниями и матрицей переходных вероятностей вида $M = \|p_{ij}\|$.

Параметры матрицы переходных вероятностей однозначно определяются параметрами аппроксимации ДФР и вычисляются по соотношениям: для элементов матрицы, соответствующих сохранению текущего ON-состояния, $p_{ii} = e^{\alpha_i}$, где $i = 1, \dots, k$ (k – число состояний, выбранных для ON-периодов); для элементов матрицы, соответствующих сохранению текущего OFF-состояния, $p_{ii} = e^{\beta_{i-k}}$, где $i = k + 1, \dots, k + l$ (l – число состояний, выбранных для OFF-периодов); для элементов матрицы вероятностей переходов из ON- в OFF-

состояния $p_{ij} = (1 - e^{\beta_{i-k}})A_j$, где $i = l + 1, \dots, k + l$, $j = 1, \dots, k$; для элементов матрицы вероятностей переходов из OFF- в ON-состояния $p_{ij} = (1 - e^{\alpha_i})B_{j-k}$, где $i = 1, \dots, k$, $j = k + 1, \dots, k + l$.

Используя найденные численные значения матрицы переходных вероятностей, осуществлено моделирование отдельного сегментированного речевого источника с заданными ДФР длительностей ON- и OFF-периодов.

Разработана методика оценки числа состояний и параметров аппроксимирующей ЦМ по статистическим характеристикам измеренного трафика ТС, подтвержденная численными экспериментами.

Модель проста в реализации и имеет конечное число параметров, которые непосредственно определяются из статистических характеристик измеренного речевого трафика на выходе кодека или мультиплексора.

В данной главе также разработаны и анализируются различные алгоритмы описания и моделирования речевого трафика на уровне вызовов и пакетов как с использованием полумарковских процессов, так и с использованием фрактального гауссовского шума (ФГШ) со смещающимся уровнем среднего.

Показано, что трафик речи на уровне вызовов может быть описан и смоделирован полумарковским процессом с переходной функцией вида $Q_{ij}(t) = p_{ij}F_{ij}(t)$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, где $F_{ij}(t) = P\{T_n < t | \xi_n = j, \xi_{n-1} = i\}$ – функция распределения времени пребывания процесса $\xi(t)$ в состоянии i , если известно, что следующим его состоянием будет состояние j ; $p_{ij} = P\{\xi_n = j | \xi_{n-1} = i\} = \lambda_{ij}/\lambda_i$, $i \neq j$; $p_{ii} = 0$ – вероятность того, что ЦМ, находящаяся в состоянии i , в очередной момент изменения состояния перейдет в состояние j ; $\{P_i(0), i \in X\}$; N – число состояний ЦМ.

При небольшом числе мультиплексируемых каналов ($N < 20$) трафик речи на уровне вызовов может быть описан и смоделирован полумарковским процессом, который полностью характеризуется своими элементами: матрицей переходных вероятностей (p_{ij}), матрицей функций распределения $F_{ij}(t)$, начальным распределением $\{P_i(0), i \in X\}$.

Для описания сильно пульсирующего трафика на пакетном уровне предложена нестационарная модель на основе ФГШ для отсчетов сетевого трафика с

масштабом времени S в моменты времени $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, описываемая соотношением $X(S_t) = m \hat{N} S + \sigma S \sum_{i=1}^{\hat{N}} G_{H,i}(t)$, $t \in T$. Здесь \hat{N} – число суммируемых ФГШ, оцениваемое из полумарковской модели вызовов; T – длительность интервала, соответствующего i -му состоянию ЦМ, который определяется ФР $F_{ij}(t) = P\{T_n < t \mid \xi_n = j, \xi_{n-1} = i\}$; $G_{H,i}(t)$ – центрированный ФГШ с показателем Херста H_i , средним значением m , среднеквадратическим отклонением (СКО) σ и корреляционной функцией $R(k) = \sigma^2/2((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H})$.

Показано, что предложенная модель трафика более реалистично описывает поведение нестационарных серий речевого трафика на малых масштабах времени. Для оценки фрактальных свойств полученных мультиплексированных последовательностей, используя сформулированные в главе модели, были смоделированы речевые источники с включенным алгоритмом VAD. По результатам оценочного анализа данных, полученных от реального LD-CELP-источника, а также данных, полученных в результате имитационного моделирования, подтверждено наличие в них сложной корреляционной структуры, что доказывает невозможность использования простейших потоков (например, пуассоновских) в качестве имитационных моделей подобных процессов.

Выявлено, что как реальные, так и полученные в результате имитационного моделирования данные обладают сложной фрактальной структурой, изменяющейся с увеличением диапазона масштабов времени.

В **Главе 4** проведен анализ и выполнена оптимизация работы ТС при передаче речевого трафика с пакетной коммутацией по критерию обеспечения заданного качества обслуживания.

На основе разработанных моделей и ПО методом имитационного моделирования проведен анализ производительности и качества обслуживания системы VoFR. В качестве исследуемого узла рассматривался маршрутизатор. Были получены показатели качества обслуживания VoFR при входных потоках, созданных на основе ЦМ и ФГШ. Под характеристиками качества обслуживания понимались: вероятность блокировки пакетов; вероятность появления на выходе пакета с задержкой, не превышающей заданную $P(t > T_{\text{пор}})$; средняя задержка τ в выборке из N пакетов при фиксированных параметрах настройки маршрутизатора; коэффициент использования канала ρ .

На основе полученного в результате имитационного моделирования трафика с различными показателями Херста на входе маршрутизатора показано (рис. 3), что увеличение степени самоподобности H влечёт за собой рост средних задержек, особенно при высоком коэффициенте использования ρ в интервале $(0,8; 0,9)$. В перегруженном состоянии из-за ограниченности размеров буфера все средние задержки сходятся к некоторому фиксированному значению. С увеличением H вероятность блокировки при неизменном числе пользователей на входе мультиплексора растёт, а эффективность системы снижается.

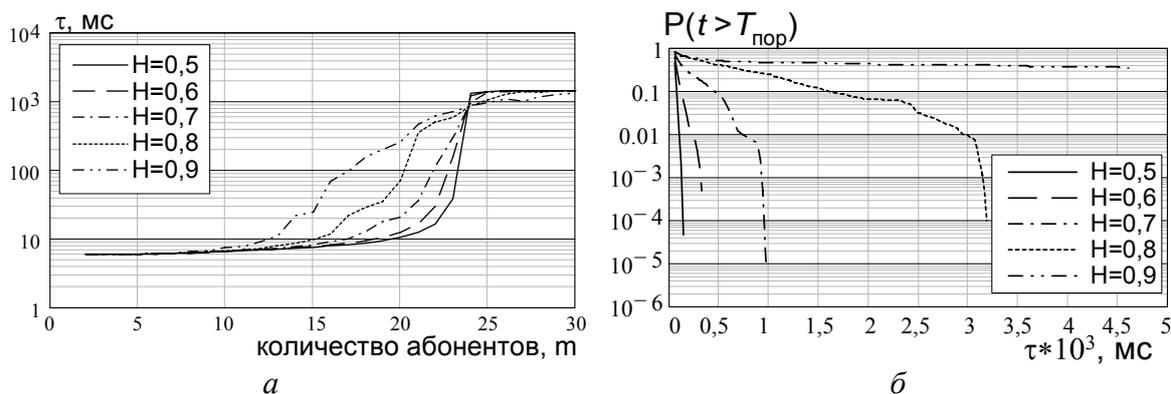


Рис. 3. Показатели качества работы мультиплексора с фрактальным трафиком на входе от числа абонентов на входе мультиплексора при скорости выходного канала 128 Кбит/с: a – задержка пакета LD-CELP; b – вероятность блокировки пакета LD-CELP

Во второй части главы – с привлечением имитационного моделирования в среде ns2 – проведен анализ производительности работы системы VoIP.

Для описания работы речевых источников был выбран генератор трафика Парето, реализованный в системе ns2. Параметризация генератора производилась на основе анализа экспериментальных данных: средний интервал активности приравнивался к 500 мс, а средний интервал тишины – к 1500 мс, параметр распределения Парето α менялся для различных экспериментов в зависимости от фрактальных свойств мультиплексированного потока.

В качестве примера на рис. 4 представлены оценки показателя самоподобности H мультиплексированного трафика, полученного в результате имитационного моделирования при значении параметра распределения Парето $\alpha = 1,4$.

Из рис. 4 видно, что полученный в результате имитационного моделирования трафик обладает фрактальными свойствами (поскольку показано $H > 0,5$). Поэтому его можно использовать для изучения влияния самоподобности на показатели производительности системы в среде имитационного моделирования ns2.

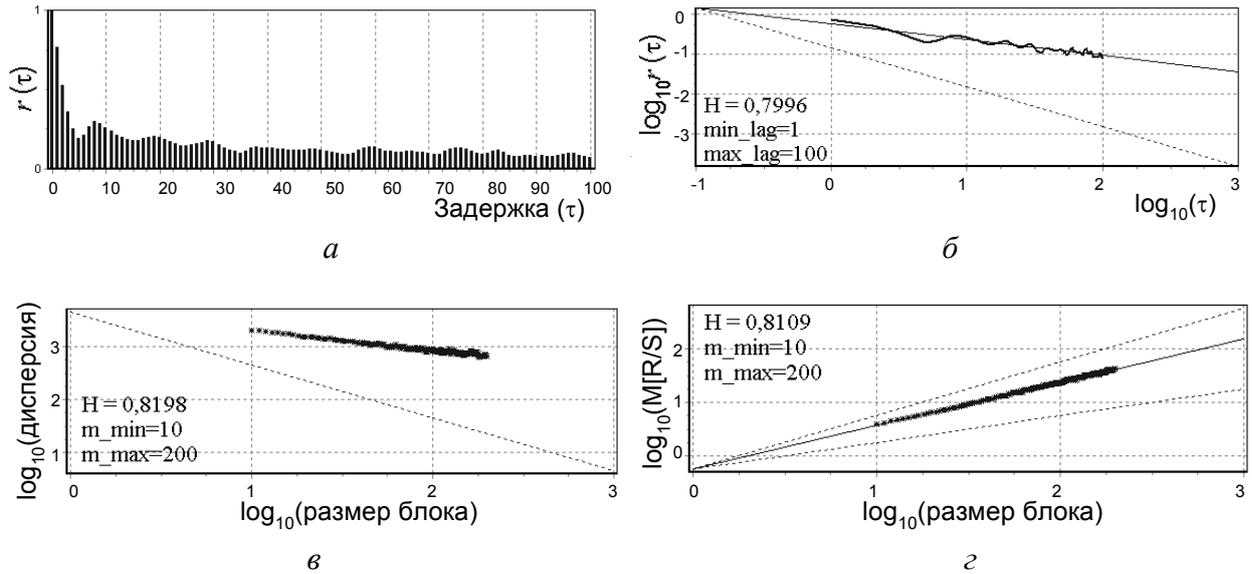


Рис. 4. Оценки параметра Херста мультиплексированного трафика при $\alpha = 1,4$: *а* – коэффициент корреляции; *б* – коэффициент корреляции в двойном логарифмическом масштабе; *в* – график изменения дисперсии; *г* – график R/S-статистики

С этой целью разработано специальное ПО и проведено имитационное моделирование по оценке основных параметров QoS ТС (процент потерянных пакетов для каждого источника $drop$, средняя задержка на IP-пакет для каждого источника $delay$, среднее значение джиттера на IP-пакет $jitter$, СКО джиттера на IP-пакет $STd.Dev.jitter$) в условиях самоподобности речевого трафика.

Результаты исследования производительности системы под воздействием фрактальных свойств мультиплексированного трафика представлены на рис. 5.

Найдено, что в целом самоподобность речевого трафика ухудшает показатели качества обслуживания.

На следующем этапе были проведены исследования по оптимизации входных параметров исследуемой ТС с целью получения заданных показателей QoS в условиях самоподобности входного трафика.

Для определенности требуемый вектор показателей качества обслуживания рассматривался как трехмерный $QoS_0 = (drop_0, delay_0, jitter_0)^T$ с заданными параметрами: $(drop_0)$ – процент потерянных пакетов %; $(delay_0)$ – задержка пакетов VoIP в c ; $(jitter_0)$ – СКО джиттера в c ; $\mathbf{X} = (C, L, N)^T$ – вектор входных параметров системы; C – значение пропускной способности наихудшего канала связи; L – значение емкости буфера FIFO; N – число пользователей услугами VoIP, находящихся за соответствующим маршрутизатором.

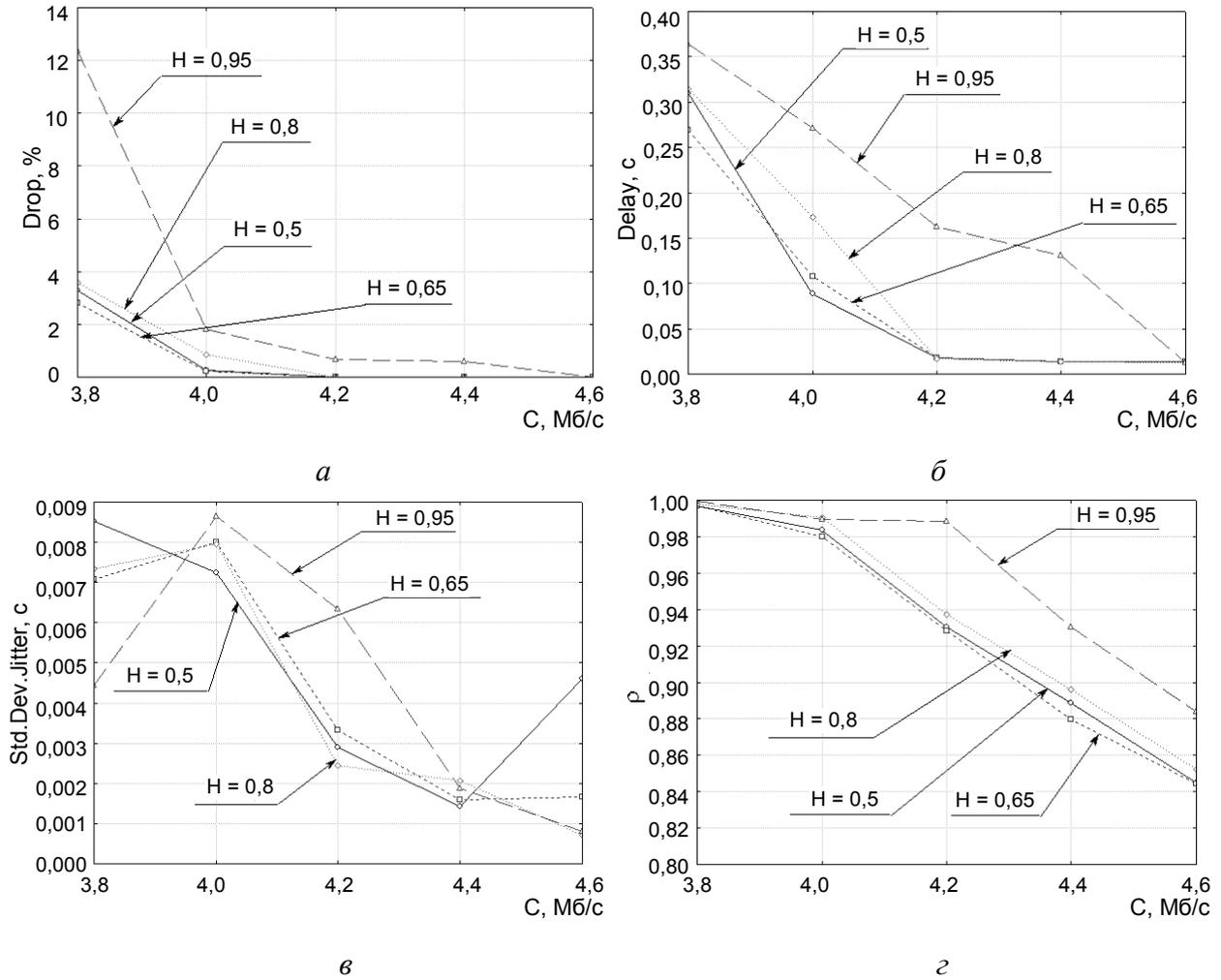


Рис. 5. Оценка влияния показателя Херста мультимплексируемого потока на показатели качества обслуживания: *а* – процент потерянных пакетов; *б* – средняя задержка; *в* – СКО джиттера; *г* – коэффициент использования

По заданному вектору \mathbf{QoS}_0 определялись требуемые параметры ТС, гарантирующие заданное качество обслуживания.

Показано, что поиск оптимума \mathbf{X}^* состоит в поиске экстремума функционала

$$\mathbf{X}^* = \underset{x \in X}{\operatorname{arg\,min}} f(\mathbf{X}_n). \quad (1)$$

Под $f(\mathbf{X}_n)$ понимается значение функционала невязки параметров качества обслуживания на n -ом шаге минимизации

$$f(\mathbf{X}_n) = \operatorname{const} \cdot \left\| \mathbf{QoS}(\mathbf{X}_n) - \mathbf{w} \right\|_2, \quad (2)$$

где $\mathbf{QoS}(\mathbf{X}_n) = (w_{\text{drop}} \mathbf{QoS}_{\text{drop } n}, w_{\text{delay}} \mathbf{QoS}_{\text{delay } n}, w_{\text{jitter}} \mathbf{QoS}_{\text{jitter } n})^T$; $\mathbf{QoS}_{\text{drop } n} = \text{drop}_n / \text{drop}_0$, $\mathbf{QoS}_{\text{delay } n} = \text{delay}_n / \text{delay}_0$, $\mathbf{QoS}_{\text{jitter } n} = \text{jitter}_n / \text{jitter}_0$ – нормированные показатели QoS, полученные на n -ом шаге минимизации; $\mathbf{w} = (w_{\text{drop}}; w_{\text{delay}}; w_{\text{jitter}})^T$ – весовой век-

тор, где $w_{\text{drop}} \in [0; 1]$, $w_{\text{delay}} \in [0; 1]$, $w_{\text{jitter}} \in [0; 1]$ – веса процента потерянных пакетов, средней задержки на пакет, СКО джиттера задержки пакетов, соответственно. В случае, если все показатели качества равновесные, вектор приравнивается единичному вектору \mathbf{e} . Субъективный характер предлагаемого критерия оптимизации, характеризуемого вектором весовых коэффициентов \mathbf{w} , обусловлен субъективным характером оценки качества речи (например, разборчивость или средняя экспертная оценка (MOS – Mean Opinion Scores)).

Вычислительный алгоритм состоит из последовательности итераций вокруг базисной точки. Вектор входных параметров на n -м шаге минимизации имеет вид $\mathbf{X}_n = (C_n, L_n, N_n)^T$, где C_n , L_n – пропускная способность наихудшего канала и емкость буфера FIFO на n -ом шаге минимизации, соответственно; N_n – число пользователей услугами VoIP, находящихся за соответствующим маршрутизатором. Под шагом минимизации понимаются соответствующие приращения координат базисной точки.

При оптимизации требуемые значения показателей качества обслуживания задаются с некоторой погрешностью $\Delta\mathbf{QoS} = (w_{\text{drop}} \Delta\text{drop}_n/\text{drop}_0, w_{\text{delay}} \times \Delta\text{delay}_n/\text{delay}_0, w_{\text{jitter}} \Delta\text{jitter}_n/\text{jitter}_0)^T$. Для оценки эффективности проведенной оптимизации результаты сравнивались с погрешностью оптимизации $\text{error} = \text{const}(\|\Delta\mathbf{QoS}\|_2 + \|\mathbf{error}_{\text{model}}\|_2)$, где $\Delta\mathbf{QoS}$ – вектор погрешностей задания выходных параметров сети (процента потерянных пакетов, средней задержки на пакет, СКО джиттера); $\mathbf{error}_{\text{model}}$ – вектор ошибок выходных показателей, вносимых моделью.

Основной целью оптимизации являлось исследование влияния показателя Херста H мультиплексированного потока на качество проводимой оптимизации при выбранной целевой функции $f(\mathbf{X}_n)$, что иллюстрируется рис. 6.

На основании численных результатов, полученных в результате имитационного моделирования минимизации функционала (2), сделан вывод о том, что использование разработанного алгоритма минимизации функционала (2) позволяет оптимизировать вектор входных параметров ТС, обеспечивая заданное качество обслуживания при допустимых погрешностях.

В процессе экспериментов использовались различные начальные точки при минимизации. Был сделан вывод, что чем дальше начальная точка отстоит от полученной в результате оптимизации, тем больше итераций требуется и тем менее точные результаты оптимизации обеспечиваются. Это означает, что при моделировании ТС необходимо иметь априорную информацию о процессе функционирования сети, которую можно использовать для проведения оптимизации.

Найдено, что результаты оптимизации зависят от степени самоподобности трафика в ТС. С увеличением показателя Херста точность производимой оптимизации существенно возрастает (показано увеличение в 2 – 2,5 раза).

Таким образом, в диссертационной работе исследованы свойства самоподобности речевого трафика, оценено влияние самоподобности на характеристики качества обслуживания, проведена оптимизация входных параметров ТС с целью обеспечения заданного QoS.

В семи приложениях приводятся: листинги ПО обработки и анализа экспериментальных данных; описание программного комплекса для обработки экспериментального трафика; результаты статистического анализа речевого трафика на уровне вызовов; описание ПО моделирования системы VoIP; описание лог-файлов моделирования; листинг ПО оптимизации; численные результаты оптимизации.

В итоге сделаны следующие выводы и заключения:

1. Проведенный статистический анализ трафика крупной корпоративной ТС показал, что суммарный трафик обладает существенными самоподобными свойствами, а также является долговременно зависимым случайным процессом, что целесообразно учитывать при оптимизации ТС.
2. Статистический анализ речевого трафика показывает, что он может быть представлен в виде двух, в общем случае нестационарных, компонент.

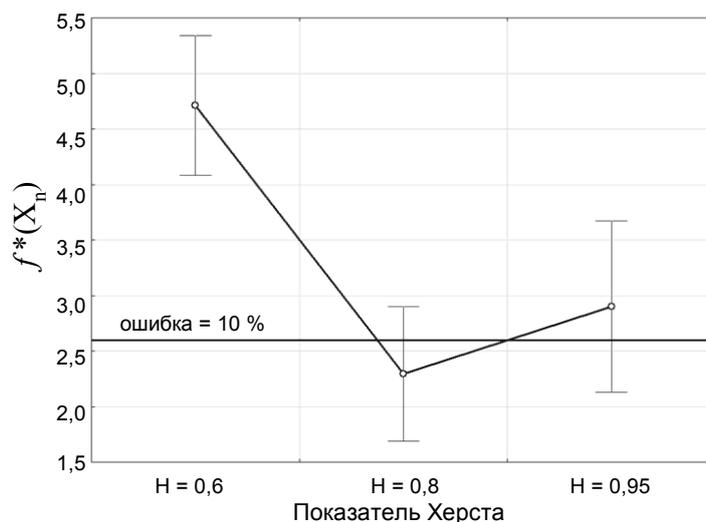


Рис. 6. Зависимости значения невязки в оптимальных точках для разных сценариев моделирования и для различных значений показателя Херста

Первая обусловлена трафиком на уровне вызовов на больших (минутных и часовых) интервалах времени. Вторая компонента присутствует только на малых (секундных и минутных) масштабах времени, имеет долговременный характер и постепенно исчезает с ростом масштаба агрегирования.

3. Трафик речи на уровне вызовов хорошо описывается полумарковским процессом, который полностью характеризуется матрицей переходных вероятностей, ФР длительностей состояний, начальным распределением состояний.

Для описания сильно пульсирующего трафика на пакетном уровне предложена нестационарная ФГШ-модель.

4. Показано, что при числе мультиплексируемых источников более 20, обрабатываемые потоки можно считать стационарными в широком смысле, а мультиплексированный трафик – самоподобным. Оценки степени самоподобности методами R/S статистики и изменения дисперсии выявили, что показатель Херста лежит в интервале 0,75 – 0,95.
5. Имитационное моделирование кодеков G.711, G.728 и G.729 показало, что суммарный речевой трафик проявляет свойства самоподобности и долговременной зависимости. Тип используемого кодека оказывает незначительное влияние на оцененный показатель Херста, а основной причиной ДВЗ в трафике VoIP являются характеристики VAD.
6. Разработана структурная схема, алгоритм и ПО для имитации работы маршрутизатора сетей Frame Relay и VoIP. На базе марковских и самоподобных процессов предложены имитационные модели трафика VoFR и VoIP, позволившие провести оценку основных характеристик маршрутизатора и QoS (в зависимости от характеристик входного трафика и очередей).
7. Разработан алгоритм и ПО оптимизации вектора входных параметров ТС. Показано, что с ростом показателя Херста (0,6 – 0,95) точность оптимизации увеличивается (для рассматриваемого случая в 2 – 2,5 раза).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шелухин О.И., Тенякшев А.В., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях: Монография / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.

2. Шелухин О.И., Тенякшев А.В., Осин А.В. Моделирование информационных систем: Учеб. пособие / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2005. – 368 с.
3. Шелухин О.И., Леднёв А.В., Осин А.В. Марковская модель цифрового речевого сигнала // LVIII научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню радио: Труды. – М.: ИПРЖР, 14 – 15 мая 2003. – Т. 1. – С. 61 – 63.
4. Шелухин О.И., Леднёв А.В., Осин А.В. О фрактальной структуре цифровых речевых потоков // LVIII научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню радио: Труды. – М.: ИПРЖР, 14 – 15 мая 2003. – Т. 1. – С. 63 – 65.
5. Осин А.В. Исследование фрактальных свойств цифрового трафика на выходе гибридных кодеков речи // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Труды / Десятая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2 – 3 марта 2004. – Т. 1. – С. 129 – 130.
6. Осин А.В. Имитационное моделирование процесса мультиплексирования цифровых потоков на выходе гибридных кодеков речи // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Труды / Десятая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2 – 3 марта 2004. – Т. 1. – С. 131 – 132.
7. Шелухин О.И., Осин А.В. Методы моделирования фрактальных процессов // XXXVI научно-методическая конференция профессорско-преподавательского состава МТУСИ: Труды. – М.: МТУСИ, 28 – 30 января 2003. – С. 110 – 112.
8. Шелухин О.И., Осин А.В. Экспериментальные исследования фрактальных процессов в сетях Ethernet // XXXVI научно-методическая конференция профессорско-преподавательского состава МТУСИ: Труды. – М.: МТУСИ, 28 – 30 января 2003. – С. 112 – 113.
9. Шелухин О.И., Осин А.В. Исследование нестационарности мультиплексированного трафика цифровых речевых потоков // Научная конференция профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ: Труды. – М.: МТУСИ, 27 – 29 января 2004. – Книга 2. – С. 140 – 141.
10. Шелухин О.И., Осин А.В. Исследования самоподобной структуры трафика Ethernet // Радиоэлектроника и информатика: Сб. науч. трудов / Вестник МГУС. – М.: МГУС, 2002. – С. 12 – 27.

11. Осин А.В. Синтез фрактального гауссовского шума // Радиоэлектроника и информатика: Сб. науч. трудов / Вестник МГУС. – М.: МГУС, 2002. – С. 27 – 37.
12. Осин А.В. Сравнительный анализ методик оценки самоподобности телекоммуникационного трафика // Радиоэлектроника и информатика: Сб. науч. трудов / Вестник МГУС. – М.: МГУС, 2002. – С. 37 – 46.
13. Осин А.В. Использование самоподобных процессов для оптимизации телекоммуникационных сетей // Индустрия сервиса в XXI веке: Труды / Третья Международная конференция. Секция «Современная бытовая техника, управляющие системы и телекоммуникации». – М.: МГУС, 2001. – С. 63.
14. Осин А.В. Самоподобность телекоммуникационного трафика // Индустрия сервиса в XXI веке: Труды / Четвертая Международная конференция. Секция «Современная бытовая техника, управляющие системы и телекоммуникации». – М.: МГУС, 2002. – С. 94 – 97.
15. Шелухин О.И., Осин А.В. О фрактальности и нестационарности цифровых речевых потоков // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Труды / V-ая Всероссийская научно-техническая конференция. – Чебоксары: ЧГУ, 2004. – С. 266 – 268.
16. Шелухин О.И., Осин А.В. Имитационное моделирование мультиплексора Frame Relay с речевыми потоками на входе, полученными с использованием марковской цепи // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Труды / V-ая Всероссийская научно-техническая конференция. – Чебоксары: ЧГУ, 2004. – С. 268 – 270.
17. Осин А.В. Имитационное моделирование сетей связи в среде ns2 в условиях самоподобного трафика // Электротехнические комплексы и информационные системы / Известия ВУЗов. – М.: МГУС, 2005. – № 1. С. 71 – 78.
18. Шелухин О.И., Осин А.В., Урьев Г.А. Результаты экспериментальных исследований сетевого трафика телекоммуникационной сети // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. – М.: МГУС, 2005. – №4. С. 90 – 95.