

На правах рукописи

УДК 004.7: 519.2

Колесников Александр Владимирович



Моделирование сетевого трафика и алгоритмы борьбы с перегрузками на основе методов нелинейной динамики и краткосрочного прогнозирования временных рядов

Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» МГТУ им. Н.Э.Баумана, проректор по информатизации
Иванов Игорь Потапович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-коммуникационных технологий» НИУ ВШЭ
Леохин Юрий Львович.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационной безопасности и автоматизации» МТУСИ
Шелухин Олег Иванович.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «28» апреля 2015 г., в 10 часов, на заседании диссертационного совета Д212.125.01 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) – МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) - МАИ

Отзывы, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, МАИ, Ученый совет МАИ

Автореферат разослан «___» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.01
кандидат технических наук, доцент



А.В.Корнеенкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое развитие телекоммуникационных технологий, а также снижение стоимости передачи и обработки информации приводит к постоянному росту объема сетевого трафика. Ежегодный отчет компании Sandvine говорит о среднем увеличении агрегированного трафика для Северной Америки на 30-40% ежегодно. На 2014 год он составляет 51,4 Гб в месяц на одного пользователя. При этом источником более 60% трафика служат мультимедиа приложения потокового аудио и видео. Как известно, трафик подобного рода наиболее чувствителен к задержкам в передаче пакетов. Так, при передаче голосовых данных критичной становится задержка более 10 мс, для потокового видео задержка не должна превышать 100 мс. Таким образом, предъявляются повышенные требования к сетям передачи данных, алгоритмам управления трафиком и, в частности, к методам борьбы с перегрузками.

Задача управления трафиком является одной из ключевых при обеспечении качества обслуживания (QoS - Quality of Service) абонентов. С точки зрения топологии сети, управление трафиком включает в себя сетевое планирование и оптимизацию. Сетевое планирование – это процесс определения топологии сети и пропускной способности каналов связи с учетом предполагаемой нагрузки. Оптимизация предполагает управление распределением трафика в существующей сети.

Борьба с перегрузками в компьютерной сети – важная часть задачи обеспечения QoS и управления трафиком в частности. Эффективные алгоритмы борьбы с перегрузками позволяют повысить не только надежность, но и полезную пропускную способность сети. Перегрузка в компьютерной сети возникает тогда, когда объем передаваемой информации приближается к максимальной пропускной способности сети. Протокол IP

для обмена данными не требует предварительной установки соединения, таким образом, сетевое устройство не может определить необходимый объем ресурсов до получения первого сообщения, это может привести к тому, что входящий поток займет все ресурсы маршрутизатора. В первую очередь это связано с использованием буферов конечной длины в коммутирующем оборудовании. При заполнении этих буферов новые пакеты начинают отбрасываться узлами сети, что в свою очередь вызывает повторную передачу сообщения, и нагрузка растет лавинообразно. Причина такой ситуации кроется в том, что протоколы транспортного уровня модели OSI, например TCP, не имеют непосредственных средств определения состояния сети, делая выводы на основе диалога с оконечными системами. Получатель в рамках протокола TCP посылает отправителю подтверждение о приеме и объем данных, которые он готов принять. Таким образом, исходные данные для алгоритмов управления каналом связи получаются достаточно грубым методом.

Для нормального функционирования сети, необходимо поддержание пропускной способности на приемлемом уровне. Ряд методик на основе обратной связи позволяют управлять пропускной способностью в зависимости от нагрузки: противодействие, сдерживающий пакет, сигнализация о перегрузке. Способы обеспечения QoS без обратной связи, такие как принцип справедливого распределения ресурсов, алгоритмы управления очередями (в том числе RED), а также алгоритмы профилирования нагрузки, функционируют на уровне сетевого устройства. Вышеперечисленные подходы к обеспечению качества обслуживания разрабатывались и тестировались на пуассоновских моделях трафика и не учитывают самоподобной структуры телекоммуникационного трафика и распределения с тяжелым хвостом. Использование более адекватных моделей трафика может способствовать разработке эффективных протоколов передачи данных и методик обеспечения качества обслуживания

абонентов. В частности, это касается методик прогнозирования трафика и состояния сети для борьбы с перегрузками.

В таком случае особенно важно не только разработать адекватный алгоритм прогноза, но и учесть природу трафика, протокол передачи, архитектуру сети, степень загруженности и характер нагрузки. В зависимости от перечисленных выше факторов статистические и динамические свойства трафика будут различаться.

Системы управления перегрузками в сети на основе прогнозируемой нагрузки показывают лучшие результаты по сравнению с системами, работающими с сетью в реальном времени. Стоит отметить, что в большинстве работ по разработке способов управления перегрузками в сети, не учитываются нелинейно-динамические свойства процесса передачи сообщений, хаотический характер трафика, а так же влияние трафика на аппаратные ресурсы серверов и сетевое оборудование. Между тем, выявление зависимостей между объемом трафика и состоянием оборудования может помочь при разработке способов прогноза перегрузок и, как следствие, повышения качества обслуживания абонентов сети. Поэтому актуальным является исследование реальной корпоративной сети, определение характера процесса передачи и обработки данных с последующей разработкой методик повышения качества обслуживания абонентов и управления перегрузками.

Применительно к телекоммуникационному трафику методы нелинейной динамики стали использоваться не так давно. Значительный вклад в развитие данного направления внесли такие исследователи как P. Abry, S. Floyd, W.E. Leland, K. Park, M.S. Taqqu, W. Willinger и др. Среди отечественных исследователей особенно стоит отметить работы Шелухина О.И., в работах которого приводятся теоретические аспекты самоподобных случайных процессов, дается объяснение, почему трафик в современных телекоммуникационных системах следует считать фрактальным, а также

рассматриваются математическая и программная реализация самоподобных математических моделей. Приводится анализ самоподобности LAN и WAN трафика с учетом особенностей протоколов транспортного и прикладного уровней, рассматривается влияние самоподобия на оценку качества предоставления услуг абонентам.

Применительно к корпоративным сетям можно отметить такие специфические особенности трафика, как разнообразие передаваемой информации, ее высокая интенсивность и объем, закрытость и ограниченность методик анализа процессов в сетевых узлах не отечественных разработок. При этом наблюдается разрыв между реально наблюдаемыми результатами функционирования сетей от распространенных математических моделей источников информации, узлов сетей и трафика. Решению этой проблемы во многом посвящены работы Иванова И.П. и других исследователей из ряда российских и зарубежных институтов и университетов. Вместе с тем, по-прежнему остается актуальной проблема рассмотрения вышеуказанных вопросов в корпоративных сетях на основе методов нелинейной динамики, что позволит осуществить внедрение и освоение новых информационных технологий для решения важных народно-хозяйственных задач во многих отраслях.

Цель работы. Целью работы являлась разработка методики борьбы с перегрузками в корпоративной сети на основе методов нелинейной динамики и краткосрочного прогнозирования поведения временных рядов, характеризующих сетевой трафик.

В рамках исследования был выделен нагруженный сервер корпоративной сети МГТУ им. Н.Э. Баумана, который в режиме реального времени осуществлял сбор и хранение данных о входящем и исходящем трафике, а также распределении аппаратных ресурсов (постоянной и оперативной памяти, ЦП, состоянии ОС).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи исследования:

- 1) Сбор и анализ реальных данных методами статистического и нелинейно-динамического анализа временных рядов; расчет параметров с целью разработки адекватной имитационной модели сети и выявление степени персистентности исследуемых данных для оценки параметров прогноза.
- 2) Разработка имитационной модели сети средствами среды Matlab и Simulink, адекватно отражающей процессы, протекающие в реальной сети передачи данных.
- 3) Разработка методики прогнозирования динамических процессов в сети передачи данных на основе рассчитанных статистических и нелинейно-динамических параметров.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы статистической обработки и прогнозирования временных рядов, методы нелинейной (хаотической и фрактальной) динамики, имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Результаты статистического и нелинейно-динамического анализа суммарного трафика сервера корпоративной компьютерной сети.
- 2) Оценка и анализ влияния входящего и исходящего трафика на аппаратную нагрузку сервера сети.
- 3) Имитационная модель сети, количественно и качественно согласующаяся с реальной корпоративной сетью, в том числе по самоподобным свойствам.
- 4) Математическая модель сетевого трафика, оптимально подходящая для описания и прогнозирования исследуемых процессов передачи трафика.
- 5) Методика борьбы с перегрузками в сети на основе оценки нелинейно-динамических свойств трафика и краткосрочного прогнозирования.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

- 1) На основании количественного и качественного анализа временных рядов суммарного трафика и распределения аппаратных ресурсов корпоративной сети установлено, что исследуемые процессы характеризуются высокой степенью самоподобия и наличием хаотических свойств.
- 2) В результате корреляционного анализа установлено, что объем входящего и исходящего сетевого трафика связан линейной зависимостью с нагрузкой на аппаратные ресурсы сервера; при этом в большей степени оказывается влияние на центральный процессор и оперативную память.
- 3) Установлено, что коэффициент использования сети может быть увеличен с помощью краткосрочного прогнозирования нагрузки и введения механизма обратной связи, учитывающего самоподобные и хаотические свойства сетевого трафика.

Научная значимость диссертации определяется следующими полученными в ней результатами:

- 1) Получены количественные и качественные оценки степени самоподобия и хаотичности агрегированного трафика сервера корпоративной сети.
- 2) Получены значения степени корреляции трафика и аппаратных ресурсов сервера.
- 3) Разработана модель, адекватно представляющая процесс передачи пакетов сообщений в корпоративной сети.
- 4) Разработана методика краткосрочного прогнозирования объема поступающего трафика с целью борьбы с перегрузками.

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в данной работе, подтверждена адекватностью совокупности применяемых для исследования математических методов, длительностью и

повторяемостью эксперимента, а также соответствием результатов имитационного моделирования, выдвигаемым положениям.

Практическая ценность работы. Предложенная в данной работе модель компьютерной сети представляет базовый функционал для имитационного моделирования сетевых процессов. Разработанная методика прогнозирования нагрузки на основе динамических свойств трафика находит применение в реальных сетях передачи данных.

Личный вклад. Все основные научные положения и выводы, составляющие содержание данной работы, получены автором лично.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты данной работы обсуждались и докладывались на международной конференции “Computer Data Analysis and Modeling: Theoretical and Applied Stochastics” (Minsk, 2013), II Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (г. Белгород, 2014 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014), конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (г. Москва, МТУСИ, 2014 г.). Работа автора «Разработка метода управления перегрузками компьютерной сети на основе нелинейно-динамических свойств трафика» была отмечена Дипломом I степени на Конкурсе научно-исследовательских работ МГТУ им. Баумана с международным участием в 2014 г. Задействованные методики и установленные результаты использованы в учебном курсе «Методы моделирования фрактальных процессов в телекоммуникационных сетях» МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 147 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 2 приложений.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор и классификация существующих моделей трафика и подходов к реализации процесса поступления сообщений от источника. Рассматриваются модели на основе процессов восстановления, как одни из первых, применяемых в моделировании сетевого взаимодействия, авторегрессионные модели и модели, основанные на марковских процессах. Приводится описание самоподобных моделей трафика, вводится понятие самоподобия. Классификация моделей проводится по характеру процесса поступления сущностей и программному обеспечению или приложению, осуществляющему передачу данных.

Во многих современных работах отмечается, что объединение трафика от нескольких переменных источников приводит к тому, что трафик становится сильно автокоррелированным с долговременной зависимостью. Это приводит к тому, что устойчивость корреляционных структур не исчезает даже для больших значений лага. Другими словами, совокупность множества источников данных, проявляющих синдром бесконечной дисперсии, в результате дает самоподобный объединенный сетевой трафик, стремящийся к фрактальному броуновскому движению. Кроме того, исследование различных трафиковых источников показывает, что высокоизменчивое поведение – это свойство, присущее архитектуре клиент/сервер.

Не существует единого причинного фактора, вызывающего самоподобность. Различные корреляции, существующие в самоподобном сетевом трафике, которые воздействуют на различных временных масштабах, могут возникать по различным причинам, проявляя себя в характеристиках на конкретных временных масштабах. При этом для оценки самоподобия процесса поступления пакетов используют показатель Хёрста H , который может быть оценен с помощью R/S -анализа выборки данных. Величина $H < 1/2$ говорит о долгосрочном некоррелированном характере ряда (антиперсистентность), $H > 1/2$ указывает на долгосрочную положительную корреляцию (персистентность).

Во второй главе произведен сбор и статистический анализ трафика и процесса распределения аппаратных ресурсов одного из физических серверов корпоративной сети МГТУ им. Н.Э. Баумана на предмет выявления самоподобных свойств. К временным рядам были применены методы корреляционного и регрессионного анализа, нелинейной динамики.

Был произведен расчет автокорреляционной функции (АКФ), чтобы оценить степень убывания зависимости процесса. Процесс с медленно убывающей зависимостью характеризуется АКФ, убывающей по степенному закону при увеличении временной задержки (рисунок 1). Для самоподобных процессов функция автокорреляции агрегированного процесса $X(m)$ при $m \rightarrow \infty$ не обращается в 0.

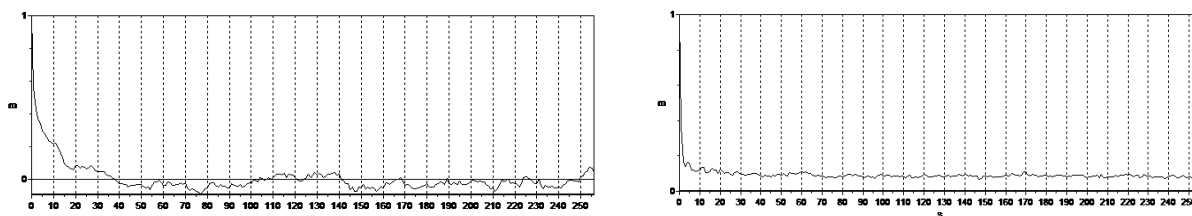


Рисунок 1 – АКФ входящего (а) и исходящего (б) трафика

Таким образом, процесс передачи трафика обладает медленно убывающей зависимостью. Исследование АКФ сетевого трафика, а так же

большинства аппаратных характеристик, позволяет в дальнейшем работать с процессами с учетом самоподобности и медленно убывающей зависимости.

Весьма интересной и малоизученной остается задача кумулятивного влияния сетевой нагрузки на распределение ресурсов сервера. В таблице 1 представлены значения парной корреляции между трафиком на разных интерфейсах сервера и аппаратной нагрузкой, темным цветом выделены наиболее значимые величины.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции регистрируемых процессов

	Вход. трафик Eth0	Вход. трафик Eth1	Исход. трафик Eth0	Исход. трафик Eth1	Сумм. загрузка ЦПУ	Объем своб. ОЗУ	Число польз. проц.	Время ожид. ЦПУ
Вход. трафик Eth0	1	0,02	0,23	0,01	0,17	-0,14	0,2	-0,12
Вход. трафик Eth1	0,02	1	0,05	0,2	0,49	-0,19	0,24	-0,17
Исход. трафик Eth0	0,23	0,05	1	0,19	0,12	-0,39	0,27	-0,1
Исход. Трафик Eth1	0,01	0,2	0,19	1	0,55	-0,28	0,33	-0,34
Сумм. загрузка ЦПУ	0,17	0,49	0,12	0,55	1	-0,24	0,39	-0,7
Объем своб. ОЗУ	-0,14	-0,19	-0,39	-0,28	-0,24	1	-0,33	0,35
Число польз. проц.	0,2	0,24	0,27	0,33	0,39	-0,33	1	-0,04
Время ожид. ЦПУ	-0,12	-0,17	-0,1	-0,34	-0,7	0,35	-0,04	1

В рамках исследования была произведена оценка экспоненты Ляпунова, как параметра, характеризующего хаотические системы. На основе теоремы Такенса по временным рядам производилось построение фазовых диаграмм (рисунок 2), позволяющих эффективно и наглядно выявлять аттракторы системы, часто малозаметные при рассмотрении исходного временного ряда.

На основе фазовой диаграммы и алгоритма Бенеттина была произведена оценка старшего показателя Ляпунова

$$\lambda_1(i) = \frac{1}{i\Delta t} \frac{1}{(M-i)} \sum_{j=1}^{M-i} \ln \frac{d_j(i)}{d_j(0)},$$

где Δt – период выборки; $d_j(i)$ – расстояние между j -й парой ближайших соседей после i дискретных шагов; M – число восстановленных точек.

Для всех типов трафика показатель Ляпунова принимает значения от 1,2 до 2,5, что в дальнейшем позволит нам работать с трафиком методами нелинейной динамики. Также стоит отметить, что показатель Ляпунова для параметров операционной системы принимает значения ниже нуля, что говорит о периодичности процессов. Проведен расчет значений размерности корреляционного интеграла и корреляционной энтропии, чтобы оценить оптимальный горизонт построения прогноза временного ряда.

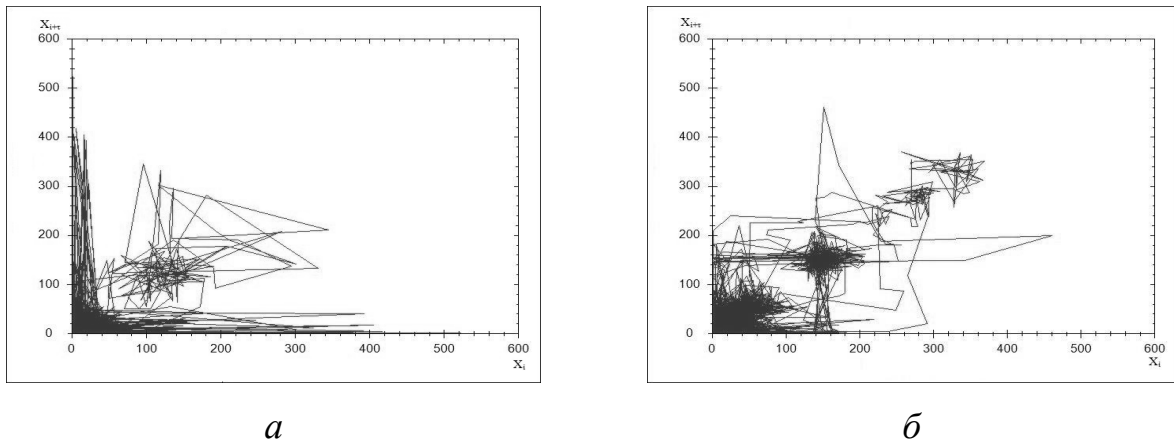


Рисунок 2 – Фазовые диаграммы входящего (*a*) и исходящего (*б*) трафика

Показатель Херста оценивался различными методами (таблица 2). Как и ожидалось, значение показателя указало на существование долгосрочной зависимости и самоподобия. Также была подтверждена гипотеза, указывающая на связь между показателем Херста и интенсивностью трафика. Так как в ряде работ указывается на зависимость показателя Херста от числа отсчетов временного ряда, выборки брались на равных интервалах.

Таблица 2 – Значение показателя Херста для некоторых процессов

Характеристика	Параметр Херста		
	R/S	Периодо-граммный анализ	Метод агрегированных дисперсий
Объем буферизированной памяти (бит)	0,9656	0,9354	0,9984
Объем кэшированной памяти (бит)	0,9868	0,9687	0,9530
Время процессора в режиме ожидания (%)	0,9575	0,9145	0,7723
Время обработки процессором системных задач (%)	0,9903	0,9458	0,7677
Объем свободной памяти (бит)	0,9336	0,9254	0,9165
Входящий трафик (бит/с)	0,9775	0,9687	0,8655
Число процессов ОС	0,8835	0,8245	0,9259
Число запущенных процессов web – сервера	0,8343	0,8175	0,8615
Исходящий трафик (бит/с)	0,9712	0,9648	0,8511

В третьей главе приведены результаты сравнительного анализа алгоритмов краткосрочного прогнозирования временных рядов для выбора модели, оптимально описывающей исследуемые процессы. Было установлено, что модель ARFIMA(p, d, q) (рисунок 3, таблица 3) превосходит остальные рассмотренные по точности прогнозирования, что согласуется со спецификой модели и самоподобным характером исследуемых процессов. ARFIMA (Autoregressive Fractionally Integrated Moving Average) представляет собой совокупность авторегрессионной модели и скользящего среднего с дробным порядком взятия разности. ARFIMA модель оптимизировалась на исторической выборке на основе алгоритма Бройден–Флетчера–Гольдфарба–Шанно, которая использует приближение Тейлора целевой функции в окрестности d точки X :

$$f(x+d) \approx q(d) = f(x) + d^T g(x) + \frac{1}{2} d^T H(x) d,$$

где $g(x)$ – градиент; $H(x)$ – матрица Гессе.

После оптимизации модели производился прогноз на 1 шаг вперед, после чего модель вновь оптимизировалась, и рассчитывался новое прогнозные значение и т.д.

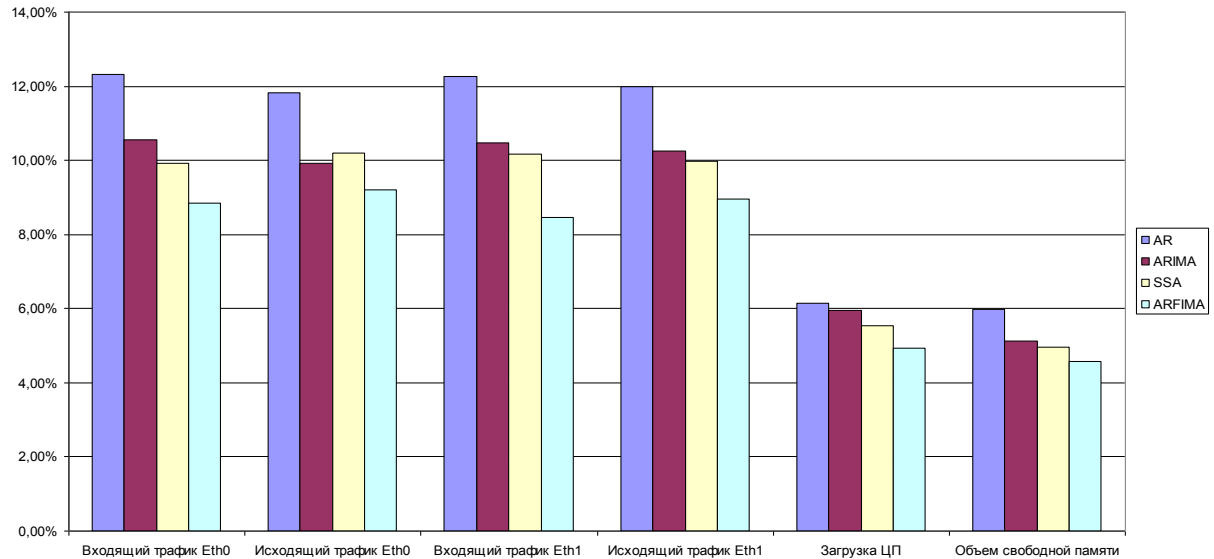


Рисунок 3 – Ошибка прогнозирования для различных моделей

Таблица 3 - Ошибка прогноза ARFIMA(p,d,q) модели

Прогнозируемый процесс	Ошибка прогноза (MAE)
Входящий трафик Eth0	8,85%
Исходящий трафик Eth0	9,21%
Входящий трафик Eth1	8,46%
Исходящий трафик Eth1	8,95%
Загрузка ЦП	4,94%
Объем свободной памяти	4,57%

В **четвертой главе** приводятся результаты моделирования передачи трафика в локальной сети с механизмом управления перегрузками с учетом кратковременного прогнозирования нагрузки. Средствами программного пакета Matlab с библиотекой Simulink разработана имитационная модель корпоративной сети, а также проведена оценка её адекватности. Принципиальная схема представлена на рисунке 4.

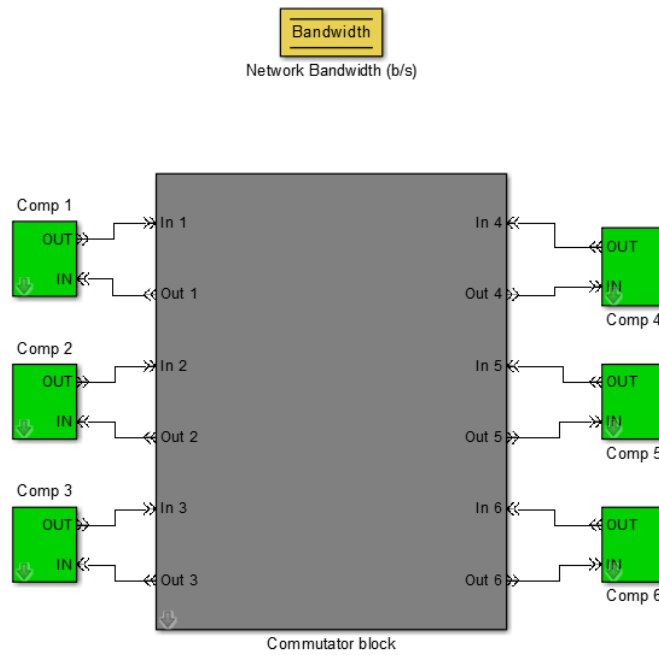


Рисунок 4 – Схема моделируемой сети

Сеть имела топологию типа «звезда» с рядом узлов, подключенных к коммутатору. Для первичной оценки работоспособности модели было проведено моделирование функционирования сети с переменной интенсивностью трафика.

Роль источников сообщений, то есть подключенных к коммутатору серверов играет модель, представленная на рисунке 5.

Каждому созданному пакету присваивается три параметра:

- PacketSize – длина сгенерированного пакета в байтах.
- ServiceTime – время обслуживания сообщения.
- Destination – адрес назначения пакета.

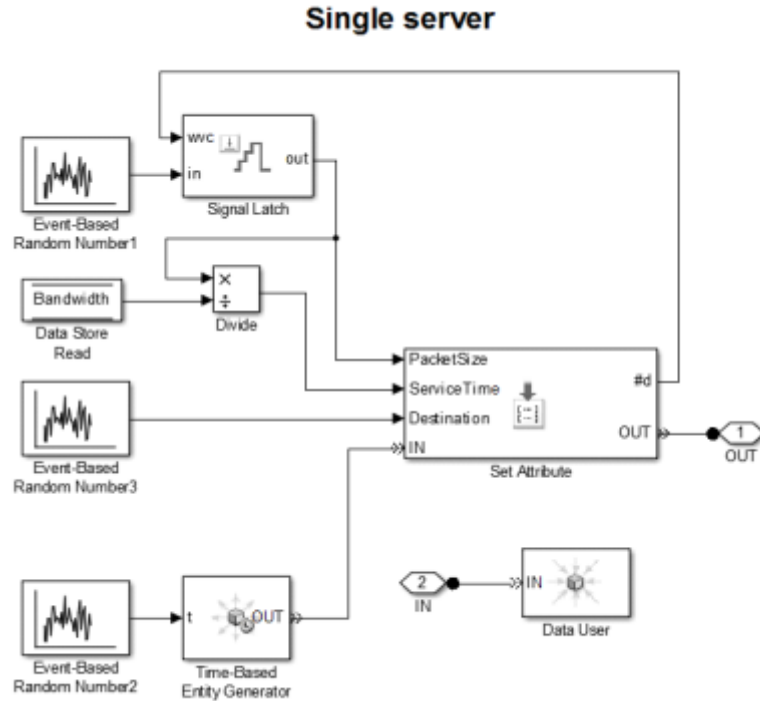


Рисунок 5 – Модель сервера, источника пакетов данных

Предложенная имитационная модель коммутатора (рисунок 6) учитывает дисциплину обслуживания заявок FIFO с контролем переполнения буфера.

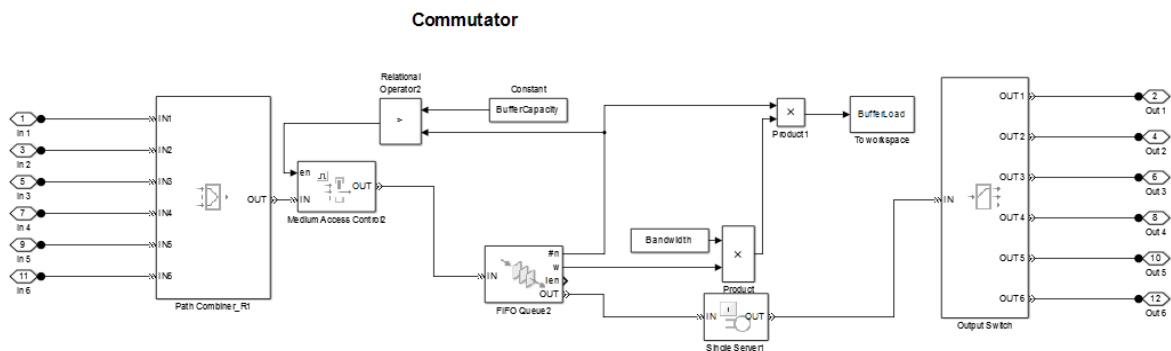


Рисунок 6 – Имитационная модель коммутатора

Данные об объеме трафика в коммутаторе в каждый конкретный момент времени рассчитываются с учетом длины сообщений в буфере и их

количества, а затем передаются в среду MatLab для дальнейшей обработки. В представленной модели основным исследуемым процессом будет загрузка буфера коммутатора и объем трафика в единицу времени.

Для первичной оценки работоспособности модели было проведено моделирование функционирования сети в течение 30 секунд с переменной интенсивностью трафика. Для каждого источника сообщений установлены одинаковые параметры, то есть длина пакетов в диапазоне, соответствующем протоколу TCP/IP от 100 до 1500 байт и скорость генерации пакетов (рисунок 7).

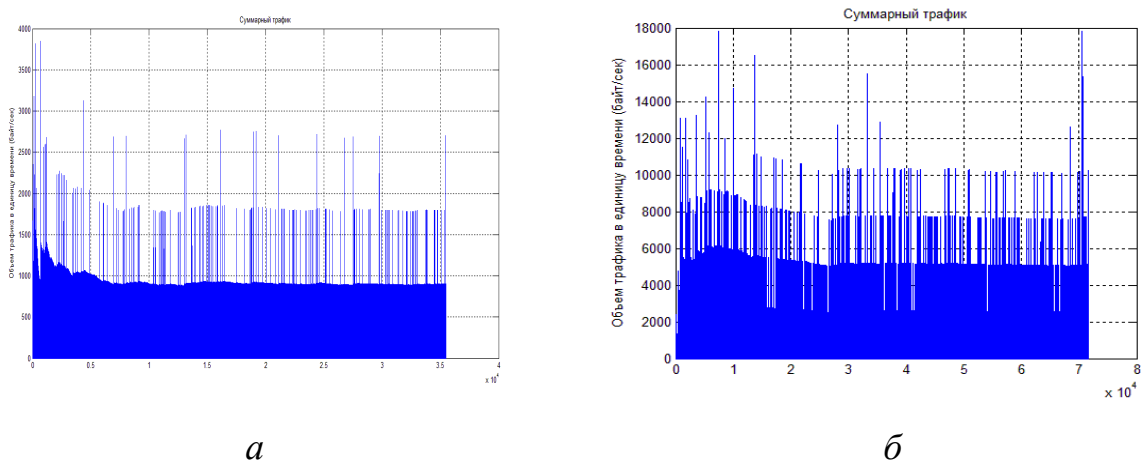


Рисунок 7 – Суммарный трафик через коммутатор при скорости генерации сообщений узлами 50 (*a*) и 100 (*б*) пакетов в сек.

Оценка АКФ показала медленно убывающую зависимость в процессе формирования трафика, что позволяет рассчитать для имитационной модели показатель Херста (рисунок 8), который в зависимости от интенсивности трафика принимает значения $0,7 < H < 0,96$. При увеличении интенсивности трафика показатель Херста растет экспоненциально.

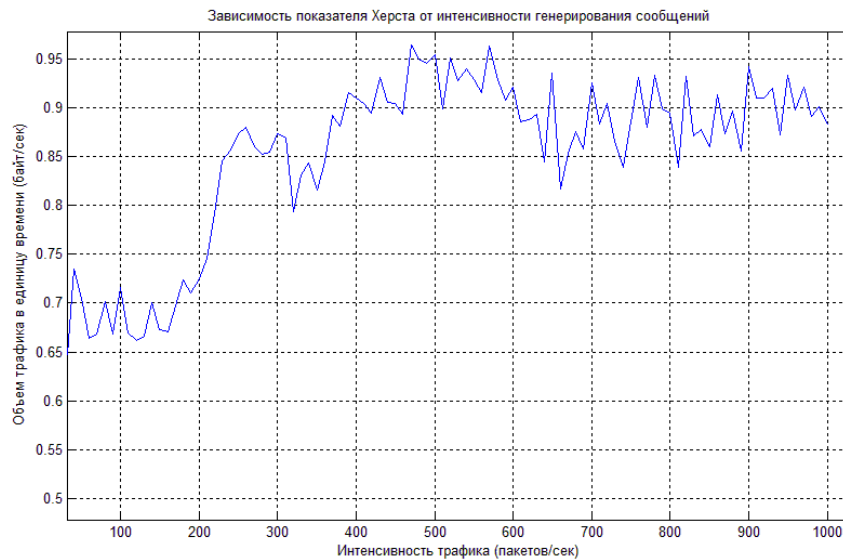


Рисунок 8 – АКФ моделируемого трафика

Разработанная имитационная модель позволяет задавать необходимые параметры источников сообщений и коммутатора, таким образом, становится возможным достичь большего соответствия между реальной корпоративной сетью и моделью. В дальнейших расчетах использовались данные о состоянии сети МГТУ им. Баумана, средний размер пакета и число пакетов в секунду. По результатам моделирования выявлено также наличие долговременной зависимости (показатель Херста $H=0,86$). Таким образом, разработанная имитационная модель корпоративной сети соответствует основным статистическим и динамическим характеристикам реального процесса передачи данных, что делает ее важным инструментом в процессе исследования сетевых процессов и моделировании информационного трафика.

Приводятся результаты моделирования передачи трафика в локальной сети с механизмом управления перегрузками с учетом кратковременного прогнозирования нагрузки. Модели источников сообщений и коммутатора значительно доработаны, реализованы характерные для TCP алгоритм затяжного пуска, динамического изменения размера окна при перегрузке,

расчет RTO на основе RTT. На уровне коммутатора проводился прогноз состояния буфера и на его основе выполнялся контроль передачи источником сообщений. Помимо этого на уровне источника сообщений проводился расчет RTO на основе прогнозируемого значения RTT пакетов. Применение механизма обратной связи, сообщающего источникам сообщений о загруженности буфера, позволяет снизить потери пакетов в среднем от 9% до 12%, результат варьируется в зависимости от параметров источника. Применение обратной связи между коммутатором и источником сообщений с учетом прогнозирования позволило повысить полезную пропускную способность на величину от 12% до 17%, при этом значение также зависит от параметров источников сообщений (рисунок 9, 10).

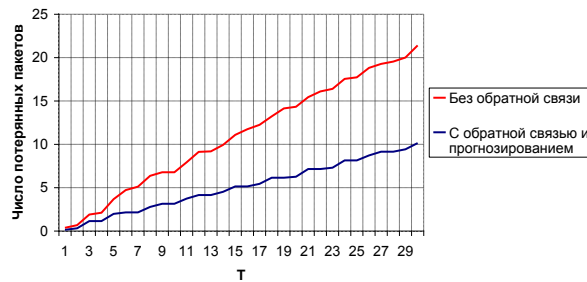


Рисунок 9 – Зависимость потерь пакетов от времени

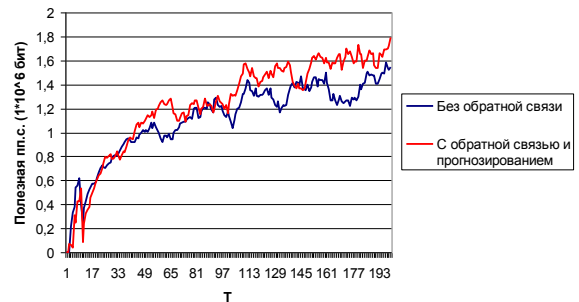


Рисунок 10 – Зависимость полезной пропускной способности сети от времени

В заключении подведены итоги диссертации:

- 1) Выполнен сбор статистических данных входящего и исходящего трафика, а также процесса распределения аппаратных ресурсов одного из физических серверов корпоративной сети МГТУ им. Н. Э. Баумана; проведен статистический и динамический анализ собранных данных, выявлен самоподобный и хаотический характер процессов.
- 2) Определена качественная и количественная зависимость между суммарным объемом трафика, проходящего через сервер в сети и распределением аппаратных ресурсов узла; проведен корреляционный и регрессионный анализ временных рядов.
- 3) Разработана и протестирована имитационная модель сети в целом и отдельных процессов передачи данных, установлена адекватность модели; получена модифицированная имитационная модель компьютерной сети с учетом кратковременного прогнозирования (ARFIMA) загрузки буфера коммутатора.
- 4) Вычислительный эксперимент показал, что предложенная методика на основе механизма обратной связи, сообщающего источникам сообщений о загруженности буфера, позволяет снизить потери пакетов в среднем от 9% до 12%; применение обратной связи между коммутатором и источником сообщений с учетом прогнозирования позволяет повысить полезную пропускную способность на величину от 12% до 17% в зависимости от параметров источников сообщений.

Публикации по теме диссертации

1. Басараб М.А., Иванов И.П., Колесников А.В. Анализ сетевого трафика корпоративной сети университета методами нелинейной динамики // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. № 08, август 2013, DOI: 10.7463/0813.0587054.

2. Колесников А.В., Иванов И.П., Басараб М.А. Нелинейно-динамические модели сетевого трафика // *Нелинейный мир*, 2014, т.12, №4, с.44-56.
3. Басараб М.А., Иванов И.П., Колесников А.В. Анализ моделей прогнозирования процессов сервера корпоративной сети // *Нелинейный мир*, 2015, т.13, №2.
4. *Basarab M.A., Ivanov I.P., Kolesnikov A.V., Kolobaev L.I. University Corporate Network Traffic Analysis Based on the Methods of Nonlinear Dynamics // Proc. of the Tenth Intern. Conf. "Computer Data Analysis and Modeling: Theoretical and Applied Stochastics", Minsk, Sept. 10-14, 2013. Vol.2. – Minsk: Publ. center of BSU, 2013, pp.99-105.*
5. *Колесников А.В. Прогнозирование процессов сервера корпоративной сети // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сб. науч. трудов по материалам II Международной научно-практической конференции, г. Белгород, 31 августа 2014 г.: в 2 ч. Ч. II. С.56-60.*
6. *Колесников А.В. Разработка модели коммутирующего устройства и исследование динамических свойств потока сообщений // Тезисы конф. Телекоммуникационные и вычислительные системы, г. Москва, МГУСИ, 26 ноября, 2014 г. С. 139.*
7. *Колесников А.В. Разработка и исследование имитационной модели корпоративной сети // «Студенческая весна», 2014.*