

На правах рукописи

Нгуен Дык Тай

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ  
СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С НЕОДНОРОДНЫМ ТРАФИКОМ НА  
ОСНОВЕ НЕЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.13 - Телекоммуникационные системы и  
компьютерные сети

Автореферат  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Алиев Тауфик Измайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Богатырев Владимир Анатольевич  
кандидат технических наук  
Никульский Игорь Евгеньевич

Ведущая организация: Ленинградский отраслевой научно-исследовательский институт связи (ЛОНИИС)

Защита диссертации состоится 15 декабря 2009 в 15.50 на заседании диссертационного совета Д 212.227.05 при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

Автореферат разослан 11 ноября 2009г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.т.н., доцент

Поляков В.И.

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** Проблема проектирования сетей передачи данных (СПД) становится все более актуальной для специалистов и ученых в этой научно-практической области в связи с ростом Всемирной сети. При проектировании и исследовании реальной СПД приходится решать большое число разнообразных задач. Первым этапом проектирования СПД является выбор технических средств и системы протоколов (включая способы коммутации и доставки данных в сети). Вторым этапом проектирования требует решения совокупности сложных взаимосвязанных задач, к которым относятся: оптимизация пропускных способностей каналов связи (КС); выбор маршрутов; оптимизация топологической структуры; выбор методов управления потоками и определение параметров управления; анализ объемов буферной памяти узлов коммутации и выбор стратегии буферизации при перезагрузках и так далее.

При решении общей задачи топологического синтеза кроме выбора оптимальной схемы соединения узлов коммутации необходимо одновременно решать задачу оптимизации маршрутов и выбора пропускных способностей КС. В данной работе рассматривается задача оценки пропускных способностей КС, решение которой известно только для модели в виде разомкнутой экспоненциальной сети массового обслуживания (СеМО) с однородным потоком заявок. При этом не учитывались специфические особенности, присущие реальным распределенным СПД. К числу таких особенностей относятся неэкспоненциальность и неоднородность трафика, многообразие топологий и алгоритмов маршрутизации, вариантов распределений прикладных программ и наборов данных по узлам сети, способов взаимодействия пользователей сети и т.д. Учет этих особенностей выполняется на этапе параметризации модели СПД, результаты которого оказывают существенное влияние на адекватность разрабатываемой модели. В связи с этим необходимо разработать методику проектирования распределенных СПД и программный комплекс для решения ряда актуальных задач: расчет потоков в распределенных сетях; определение пропускных способностей КС СПД; выбор дискретных значений ПС; построение имитационных моделей КС и спроектированных СПД в среде GPSS World; анализ погрешностей приближенных методов расчета временных характеристик КС и СПД. Кроме того необходимо выполнить анализ влияния на характеристики функционирования СПД таких параметров передачи данных как длина пакетов, характер трафика в сетях (влияние законов распределений), скорость передачи пакетов в КС и т.д.

**Объект исследований.** Объектом исследований диссертационной работы является сеть передачи данных с неоднородным трафиком.

**Предмет исследований.** В диссертационной работе предметом исследований являются модели, методы и инструментальные средства для оценки эффективности и системного проектирования СПД с неоднородным трафиком.

**Целью работы** является разработка и исследование методов и средств оценки пропускных способностей каналов связи СПД на основе аналитического и имитационного моделирования с учетом специфических особенностей, присущих реальным распределенным СПД, а также анализ влияния процессов передачи данных на характеристики функционирования СПД с помощью имитационного метода.

Цель работы достигается решением следующих **задач**.

1. Разработка метода сведения неоднородного потока пакетов в СПД к однородному и перерасчет параметров пакетов на основе параметров сообщений, при этом ключевой задачей является разработка метода расчета интенсивностей потока пакетов в КС с учетом топологии СПД, метода маршрутизации, способа распределения по узлам прикладных программ и наборов данных, способа взаимодействия пользователей, длин сообщений и пакетов.
2. Анализ влияния длины пакетов, характера трафиков в сетях (влияния законов распределений) и скорости передачи пакетов в каналах связи на характеристики функционирования СПД.
3. Разработка программного комплекса для проектирования и исследования СПД позволяет решить следующие актуальные задачи: оптимизация пропускных способностей КС СПД при ограничениях на время доставки пакетов или на стоимость сети с использованием модели в виде разомкнутой СеМО с учетом специфических особенностей реальных СПД; выбор дискретных значений пропускных способностей на основе полученных непрерывных значений; оценка погрешностей аналитических методов расчета модели канала передачи данных с использованием имитационного моделирования.
4. Разработка средств автоматического построения имитационных моделей в среде GPSS World, предназначенных для детального анализа характеристик функционирования канала связи и сети, спроектированной в процессе аналитического моделирования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач используются методы теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории графов, аналитическое и имитационное моделирование, объектно-ориентированное программирование.

**Научная новизна** работы заключается:

- 1) в разработке методов расчета потоков пакетов в каналах связи на основе заданных внешних интенсивностей потоков сообщений при заданной топологии СПД и известном алгоритме маршрутизации в СПД, позволяющих полностью решить задачу выбора пропускной способности каналов связи на основе аналитического моделирования;
- 2) в разработке имитационных моделей для исследования характеристик каналов связи с использованием моделей в виде СМО типа G/G/1 и интерпретации результатов анализа погрешностей расчета характеристик с использованием приближенных аналитических методов;

- 3) в оценке погрешностей аналитических методов аналитических методов расчета неэкспоненциальных моделей канала передачи данных и СПД с использованием имитационного моделирования;
- 4) в анализе влияния длины пакетов, характера трафиков в сетях (влияния законов распределений) и скорости передачи пакетов в каналах связи на характеристики функционирования СПД.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем.

1. Сформулирована методика расчета потоков пакетов в каналах связи на основе заданных внешних интенсивностей неоднородного потока сообщений, заданного алгоритма маршрутизации и других особенностей СПД.
2. Разработан программный комплекс для проектирования и исследования СПД, позволяющий решать следующие актуальные задачи:
  - а) оптимизацию пропускных способностей каналов связи СПД при ограничениях на время доставки пакетов или на стоимость сети с использованием модели в виде разомкнутой СеМО с учетом специфических особенностей реальных СПД, таких как неоднородность потока поступающих в сеть сообщений, многообразие топологий СПД, способов распределения прикладных программ и наборов данных по узлам сети, способов взаимодействия сети, вариантов маршрутизации;
  - б) выбор дискретных значений пропускных способностей на основе полученных непрерывных значений;
  - в) автоматическое построение имитационных моделей канала связи и спроектированной СПД;
  - г) расчет временных характеристик спроектированной СПД на основе имитационного моделирования.
3. Сформулированы рекомендации по применению в инженерных расчетах приближенных аналитических методов оценки характеристик СПД при больших нагрузках.

**Практическая реализация и внедрение результатов исследований.**

Основные результаты работы внедрены в ООО ЛМТ (г. Санкт-Петербург), а также в учебном процессе на кафедре вычислительной техники СПбГУ ИТМО в рамках учебных дисциплин "Сети ЭВМ и телекоммуникации" и "Теория проектирования вычислительных систем и сетей".

**Апробация работы.** Результаты выполненных исследований были представлены на IV-й межвузовской конференции молодых ученых, XXXVII-й научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО, V-й всероссийской межвузовской конференции молодых ученых, III-й всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2007), IV-й всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009)

**Публикации** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 работах общим объемом 40 страниц: 6 научных статей [1,3-7] и 1 тезисы доклада [2].

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, основной части, содержащей 4 главы, заключения, трех приложений и списка литературы. Общий объем работы – 145 страниц. Работа содержит 49 иллюстраций и 15 таблиц. Список литературы включает 42 библиографических источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности рассматриваемых в диссертации задач. Формулируются цель, задачи и методы исследования, излагается кратко содержание диссертации.

В **первой главе** рассматриваются общие принципы структурной и функциональной организации распределенных СПД, задачи проектирования и различные методы исследования СПД, а также проблемы расчета моделей СПД.

Выполнен обзор моделей и методов исследования СПД. При этом модели СПД различных классов строятся на основе моделей массового обслуживания. Рассмотрены классификации систем (СМО) и сетей (СеМО) массового обслуживания. СМО используются в качестве моделей каналов связи, а СеМО – в качестве моделей СПД. Для исследования СПД используются аналитические (точные, приближенные и эвристические) и имитационные методы. Точные аналитические методы используются для экспоненциальных моделей, приближенные методы используются для расчета неэкспоненциальных моделей, расчет которых точными методами не возможен. Имитационное моделирование реализуется в среде GPSS World, используемой для исследования сложных систем с дискретным характером функционирования.

Во **второй главе** рассматриваются задачи сведения неоднородного потока к однородному, расчета потоков пакетов в КС и оценки пропускных способностей каналов связи СПД с учетом реальных особенностей.

Выявлены основные отличия традиционной задачи оптимизации пропускных способностей каналов связи с однородной нагрузкой, предположенной Клейнроком, от задачи оптимизации с неоднородной нагрузкой, рассматриваемой в диссертационной работе.

Неоднородность потоков пакетов описывается параметрами разных типов сообщений, к ним относятся: средняя длина сообщений, средняя внешняя интенсивность сообщений от пользователей. Кроме того, при сведении неоднородного потока к однородному необходимо учитывать топологию СПД, метод маршрутизации, модель взаимодействия пользователей, распределение прикладных программ и наборов данных по узлам сети и т.д.

Расчет потоков пакетов в каналах СПД проводится в три этапа. На первом этапе выполняется расчет интенсивностей  $\lambda_{i,j}$  пакетов из узла  $i$  в узел  $j$  путем умножения внешних интенсивностей  $\Lambda_{i,j}$  сообщений из узла  $i$  в узел  $j$  на число пакетов  $k = 1, 2, \dots$  в одном сообщении:

$$\lambda_{i,j} = k\Lambda_{i,j} \quad (i, j = \overline{1, n}; \quad i \neq j),$$

На втором этапе расчет интенсивностей пакетов в КС выполняется на основе вычисленных на первом этапе внешних интенсивностей потоков пакетов, заданных таблиц маршрутизации и вероятности передачи по основному пути:

$$\lambda_{(k,l)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} X_{(k,l)}^{(i,j)} \quad (k, l = \overline{1, n}; \quad k \neq l),$$

где  $X_{(k,l)}^{(i,j)}$  – доля пакетов ( $0 \leq X_{(k,l)}^{(i,j)} \leq 1$ ), проходящих по каналу  $(k,l)$ , причем должно выполняться условие сохранения потока в сети:

$$\sum_{k=1}^n X_{(k,l)}^{(i,j)} - \sum_{k=1}^n X_{(l,k)}^{(i,j)} = \begin{cases} -1, & l=i; \\ 0, & l \neq i; \\ 1, & l=j. \end{cases}$$

Для определения  $X_{(k,l)}^{(i,j)}$  используется обратная рекурсивная процедура, определяющая распределение интенсивностей потоков на паре ( $i$  – узел-источник,  $j$  – узел-назначение) и суммирующая их при рассмотрении всех пар узлов. Эта процедура реализуется следующим образом. Сканируются все узлы, через которые пакеты могут пройти от узла-источника к узлу-назначения с учетом таблиц маршрутизации, и строится двоичное дерево, причем для каждого узла рассматриваются два пути передачи пакета: основной и альтернативный. СПД отличается от двоичного дерева тем, что ее топология произвольная. Для того, чтобы устранить ситуацию, когда пакеты могут циркулировать в сети бесконечно, используется маскирование узлов, которые уже сканировались.

При вызове рекурсивной процедуры доля пакетов в каждом из каналов связи рассчитывается по правилу:

1) если следующий рассматриваемый узел является основным и он не маскирован, то доля пакетов в этом канале увеличивается на величину, равную произведению вероятности передачи пакетов по основному пути на долю пакетов предыдущего КС;

2) если следующий рассматриваемый узел является альтернативным и он не маскирован, то доля пакетов в этом канале увеличивается на величину, равную произведению вероятности передачи по альтернативному пути на долю пакетов предыдущего канала связи.

Рекурсивная процедура вызывается только тогда, когда следующий рассматриваемый узел в процессе сканирования не маскирован и не совпадает с узлом-назначения. Обратный механизм в рекурсивном алгоритме

реализуется с помощью массива маскирования – после вызова рекурсивной процедуры какой-то пары (узел-источник, узел-назначение) нужно отметить узел-источник как немаскированный.

Если основной путь рассматриваемого узла совпадает с узлом-назначения и альтернативный путь этого узла является маскированным узлом, то к доли пакетов основного канала связи добавляется доля пакетов альтернативного, равная произведению вероятности передачи пакета по альтернативному пути на долю пакетов предыдущего канала связи, так как пакеты не могут повторно попадать в один и тот же узел СПД.

На третьем этапе выполняется расчет коэффициентов передач для каждого канала связи  $(k,l)$ :  $\alpha_{(k,l)} = \lambda_{(k,l)} / \lambda_{\text{вн.}}$ , где  $\lambda_{\text{вн.}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j}$  - суммарная интенсивность поступления пакетов в СПД.

После расчета интенсивностей пакетов в КС для каждого типа сообщений с использованием вышеприведенного алгоритма неоднородный поток пакетов сводится к однородному путем суммирования интенсивностей потоков пакетов в КС.

Данный алгоритм расчета интенсивностей пакетов встроен в программный комплекс и представляет собой ключевой этап для решения задачи оценки пропускных способностей на основе метода Лагранжа.

Представлена задача оптимизации пропускных способностей каналов связи на основе метода Лагранжа при ограничении на среднее время доставки пакетов в СПД и на стоимость СПД. Приведен алгоритм выбора дискретных значений пропускных способностей на основе полученных непрерывных значений.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния процессов передачи данных на характеристики функционирования СПД.

Выполнены многочисленные имитационные эксперименты для оценки погрешностей аналитических методов расчета модели канала связи, базирующихся на приближенных формулах расчета временных характеристик канала связи.

Эксперименты позволяют сделать вывод о том, что приближенная формула расчета временных характеристик системы G/M/1, используемой в качестве модели КС, дает небольшую погрешность для потока, коэффициент вариации (КВ) которого меньше 1 (в большинстве случаев она меньше 20% при загрузке больше 0.3). Для потока, КВ которого больше 1, при увеличении загрузки уменьшение этой погрешности близко к линейному. При большой загрузке канала связи погрешность расчета характеристик передачи пакетов находится в пределах 20%, приемлемых для инженерных расчетов (рис. 1). Многочисленные имитационные эксперименты позволили выполнить детальное исследование характеристик системы G/G/1 и сделать следующие выводы.

1. Чем меньше загрузка исследуемой системы, тем большую погрешность дает приближенная формула.

2. При изменении загрузки системы за счет варьирования среднего времени обслуживания (при фиксированном среднем времени поступления) и за счет варьирования среднего времени поступления (при фиксированном среднем времени обслуживания) эксперименты дают одинаковый результат, то есть результаты расчета погрешностей характеристик не зависят от того, за счет какого параметра изменяется нагрузка.

Формула расчета коэффициентов вариаций исходящего потока канала связи дает в большинстве случаев верхнюю границу для коэффициента вариации исходящего потока заявок из системы  $G/G/1$ , причем относительная погрешность формулы находится в приемлемых пределах (меньше 20%) при малой загрузке системы (от 0 до 0.4) для коэффициентов вариации входного потока заявок больше 1, а также при большой загрузке системы (от 0.8 до 1) для случаев КВ меньше 1 (рис. 2).

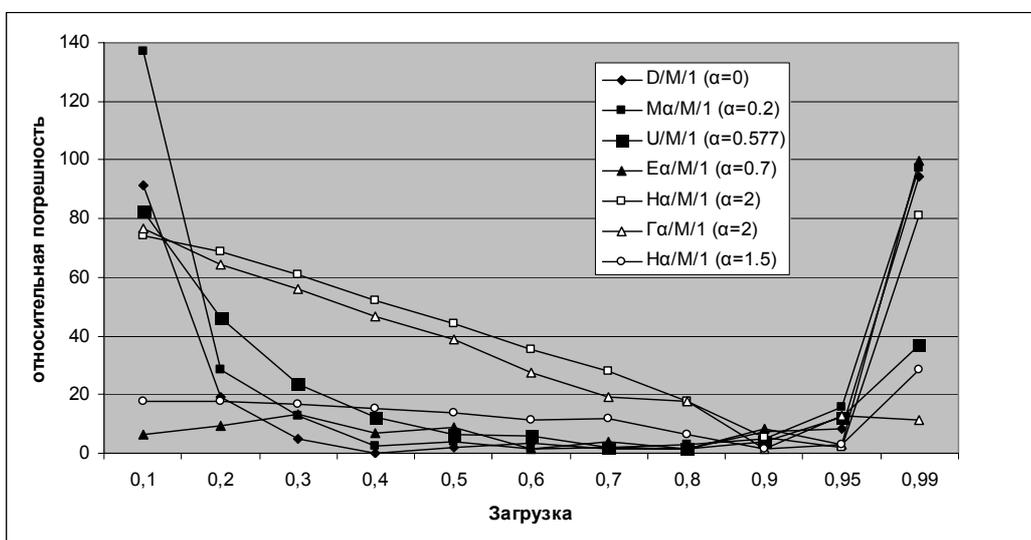


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности времени ожидания от загрузки системы  $G/M/1$

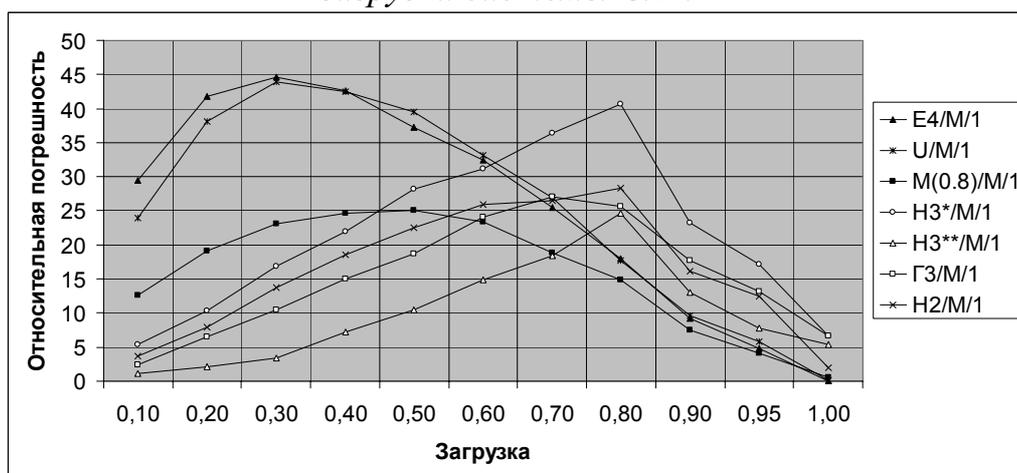


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности коэффициентов вариации исходящего потока от загрузки системы  $G/M/1$

Рассмотрены разные подходы по оценке влияния ограниченной длины пакетов на характеристики каналов в отдельности и в сети в целом. Показано, что для нормирования усеченного экспоненциального распределения оба метода (имитационный и комбинация аналитического и имитационного) дают одинаковые результаты. Для экспоненциального распределения оба способа ограничения пакетов слева и справа (усечением и смещением) дают практически одинаковые временные характеристики передачи данных. Однако, для гиперэкспоненциального распределения способ «со смещением» дает значения времени ожидания значительно большие, чем для случая «с усечением» (рис. 3).

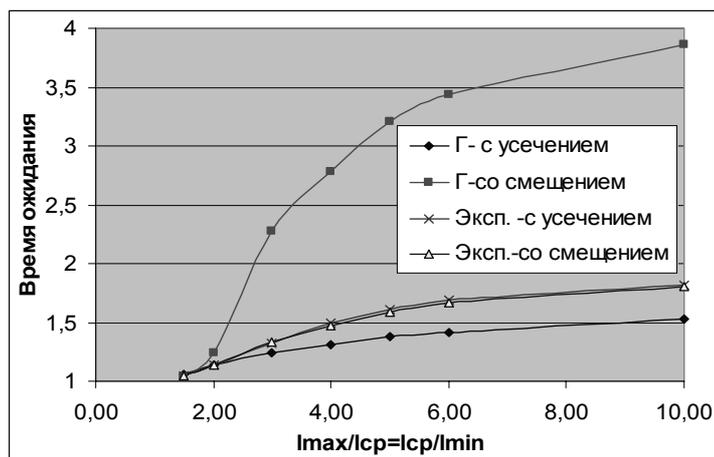


Рис. 3. Зависимость времени ожидания пакетов от отношения между максимальной (минимальной) и средней длиной пакетов

Для сети Ethernet относительное отклонение результатов распределения со смещением по сравнению с традиционными составляет десятки процентов, и это отклонение увеличивается с увеличением загрузки канала и может превышать 100% для гиперэкспоненциального распределения (рис. 4). Традиционные распределения могут использоваться при моделировании сети TCP/IP из-за большого отношения между максимальной  $l_{max}$  (минимальной –  $l_{min}$ ) и средней  $l_{cp}$  длиной пакетов. Различие в результатах для СПД, в общем случае, может составлять десятки процентов, что делает необходимым учет ограниченной длины пакетов в процессе системотехнического проектирования СПД.

Проведен анализ влияния характера трафика в СПД и длительности передачи пакетов в каналах связи на характеристики функционирования СПД. Когда все КВ распределения потоков и времени передачи пакетов в каналах увеличиваются до единицы, все временные характеристики неэкспоненциальной сети стремятся к временным характеристикам экспоненциальной сети, т.е. можно говорить, что экспоненциальная сеть рассматривается как верхний предел в данном случае. Когда значения КВ разных распределений совпадают, характеристики сети почти совпадают. В сетях с гиперэкспоненциальным распределением времени обслуживания (передачи) пакетов в каналах СПД обеспечивается меньшее значение

времени доставки пакетов по сравнению с Гамма-распределением, причем при больших значениях КВ это различие может составлять десятки процентов. При больших значениях КВ интервалов времени между поступающими в сеть пакетами и времени их передачи по каналам связи необходимо учитывать более высокие моменты распределений, в частности третий момент, который обуславливает значительное различие времени доставки пакетов в СПД.

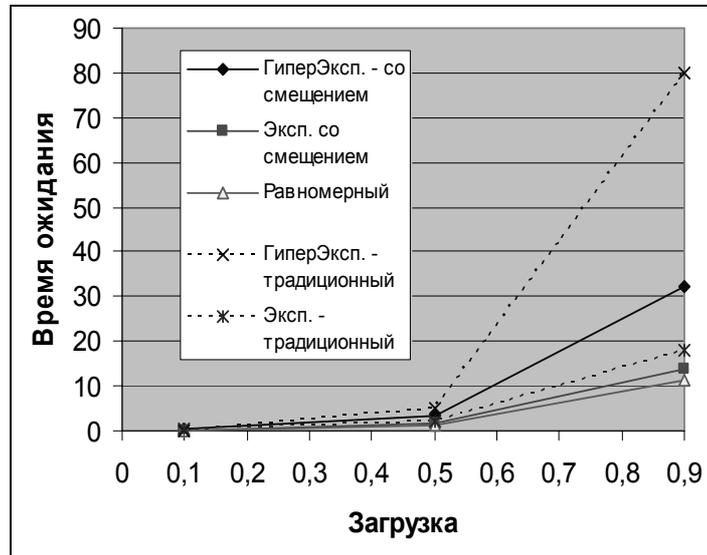


Рис. 4. Зависимость времени ожидания пакетов от загрузки канала

Рассмотрено влияние третьего момента гиперэкспоненциального (с КВ больше 1) и гипоекспоненциального (с КВ меньше 1) распределения времени обслуживания (передачи пакетов в канале) на характеристики системы. Для гиперэкспоненциального закона с одними и тем же вторым моментом можно получить разные значения третьего момента, и чем больше значение второго момента, тем больше значение третьего момента и их различие. Зависимости времени ожидания систем  $H_2/M/1$ ,  $H_2/D/1$ ,  $H_2/\Gamma_2/1$ , (где  $\Gamma_2$  – Гамма-распределение с коэффициентом вариации 2) от величин третьего момента гиперэкспоненциального потока для загрузки 0.5 и 0.9, показаны на графиках рис. 5, а и рис. 5, б соответственно. Графики показывают, что чем больше значения третьего момента, тем меньше время ожидания в системе. Однако, когда загрузка равна 0.5, время ожидания разных систем резко падает вниз при незначительном изменении третьего момента в начале (когда значения третьего момента  $<100$ ) и почти не изменяется, когда эти значения больше 100. Для случая, когда загрузка равна 0.9, время ожидания систем более «линейно» зависит от третьего момента. Для всех случаев, время ожидания сильно зависит от третьего момента и дает большое различие (больше 100% при загрузке 0.5).

Аппроксимацию гипоекспоненциального распределения выполним по двум моментам. Предположим, что аппроксимирующее гипоекспоненциальное распределение  $k$ -го порядка содержит только два типа

экспоненциальных фаз:  $k_1$  фаз с параметром  $\alpha_1 = 1/t_1$  и  $k_2 = k - k_1$  фаз с параметром  $\alpha_2 = 1/t_2$ , где  $t_1$  и  $t_2$  – математические ожидания экспоненциально распределенных случайных величин в фазах первого и второго типов соответственно. Условия для такой аппроксимации формулируются следующим образом:  $k_2 \leq \frac{1}{\nu^2} \leq k$ , где  $\nu$  – коэффициент вариации гипоекспоненциального распределения ( $0 < \nu < 1$ ).

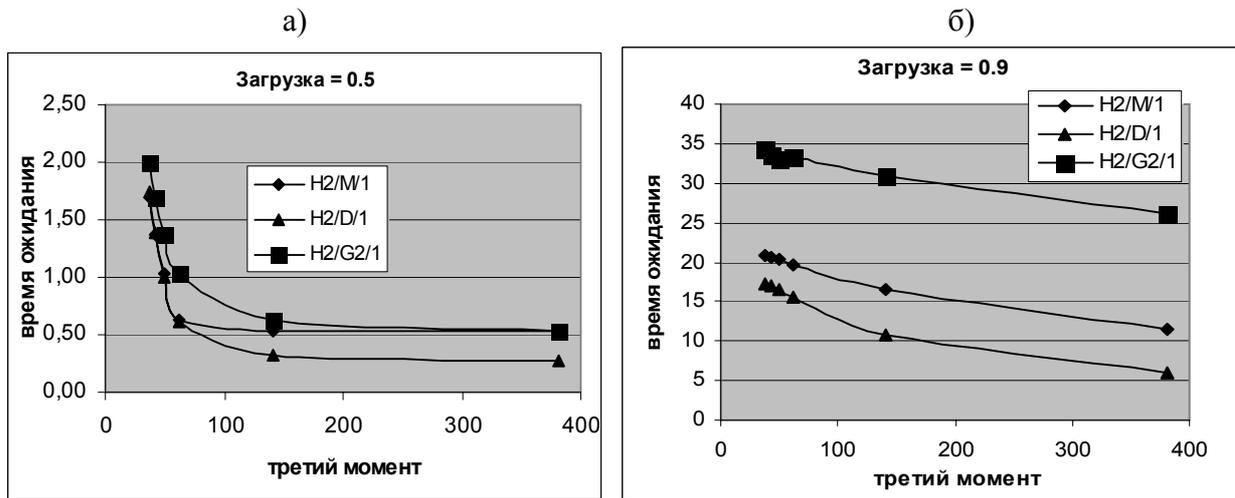


Рис. 5. Зависимость времени ожидания системы H2/G/1 от третьего момента гиперэкспоненциального потока (входного)

Исследование влияния третьего момента ЗР поступающего в систему  $E_x/G/1$  потока на время ожидания дает результаты, показанные на рис. 6. На графиках показаны влияния третьего момента гипоекспоненциального поступающего потока с разными КВ на относительное различие между максимальным и минимальным значениями времени ожидания нескольких систем при  $k = 50$ . Каждому значению КВ на графике соответствует относительное различие (%) между средними временами ожидания, вычисленными при максимальном и минимальном значениях третьего момента. Максимальное время ожидания получается при минимальном значении третьего момента (когда  $k_1 = 1/\nu^2$ ) и минимальное время ожидания – при максимальном значении третьего момента (когда  $k_1 = 1$ ). Для случаев, когда КВ равны 0.8 и 0.9 (когда  $1/\nu^2 = 1$ ) это относительное различие незначительно (в большинстве случаев оно меньше 5%), при этом третий момент достигает минимального значения при  $k = 1/\nu^2 + 1$  (однако это тоже не приводит к сильному изменению). Время ожидания не только зависит от загрузки и закона распределения времени обслуживания в системе, но и от третьего момента гипоекспоненциального распределения поступающего потока.

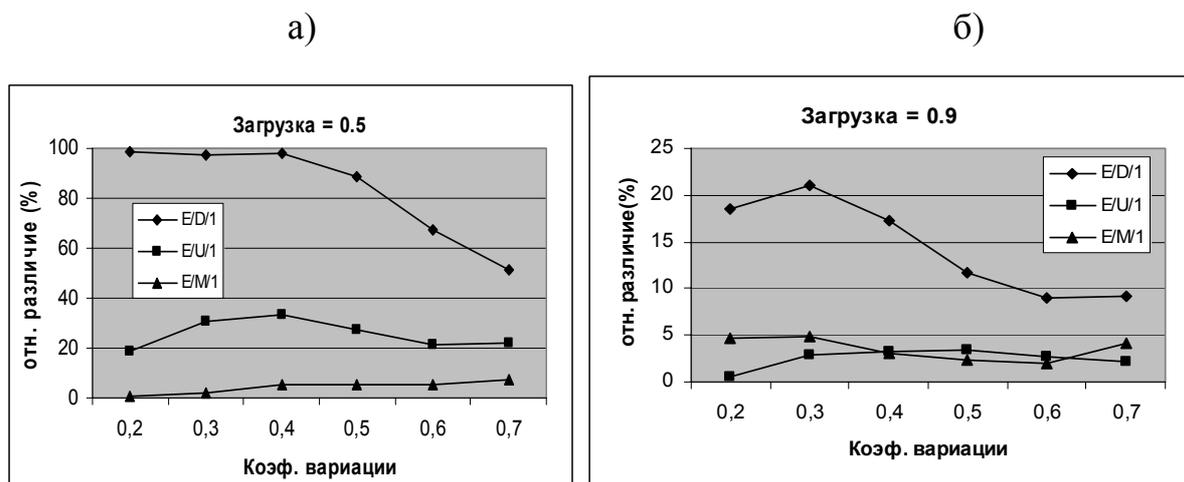


Рис. 6. Влияние третьего момента закона распределения поступающего в систему  $E_x/G/1$  потока на времени ожидания при загрузках 0.5 (а) и 0.9 (б)

В **четвертой главе** представлено описание разработанного программного комплекса "DCNET" для исследования СПД с неоднородным потоком сообщений на основе аналитического и имитационного моделирования. Программа "DCNET" написана с использованием Visual C++ 7.0 под Windows. Объектно-ориентированное программирование на MFC (библиотека базовых классов Microsoft - Microsoft Foundation Classes) с архитектурой Doc/View использовано для удобства разработки и реализации приложений под Windows. Программа "DCNET" работает под ОС Windows 2000/XP с требованием памяти не более 64Мбайт.

Задача проектирования сети состоит в определении пропускных способностей КС с учетом неоднородности трафика, многообразия топологий, алгоритмов маршрутизации, вариантов размещения прикладных программ и наборов данных по узлам сети, способов взаимодействия пользователей сети.

Аналитическая модель СПД строится в виде разомкнутой СеМО для любой топологии сети, задаваемой аналитически или графически. На основе аналитической модели решается задача определения пропускных способностей КС в распределенных СПД при ограничениях на время доставки пакетов или на стоимость сети.

Программа позволяет рассчитать характеристики СПД, такие как пропускных способностей КС, время задержки пакетов при передаче по каждому каналу и в сети в целом, а также загрузку каждого КС. Кроме того рассчитываются интенсивности потоков пакетов в каналах связи и вероятности передачи пакетов от пользователей в сеть, между каналами и из сети к пользователям. Программа позволяет варьировать полученные характеристики, такие как пропускных способностей, время передачи по КС, загрузки КС, время доставки пакетов в СПД и стоимость СПД для получения необходимых результатов. Кроме того, она позволяет выбрать значения пропускных способностей из дискретного ряда значений, найденных из

традиционной оптимизации непрерывных значений пропускных способностей.

Имитационная модель СПД на языке GPSS World генерируется автоматически на основе расчета характеристик аналитической модели в виде разомкнутой экспоненциальной СеМО. Полученные характеристики аналитической модели используются в качестве параметров имитационной модели СПД, представляющей собой разомкнутой СеМО, узлы которой соответствуют каналам связи, а заявки - пакетам в СПД. Число источников заявок в имитационной модели равно числу узлов в СПД, при этом интенсивности поступления заявок в модели определяются как внешние интенсивности пакетов от пользователей к узлам СПД соответственно. Аналитическая модель, реализованная в программе, позволяет рассчитать следующие параметры для имитационной модели.

1. Вероятность передачи пакетов от пользователя  $j$  к каналу  $k$ :  $P_{(j,k)}^n = \lambda_{(k,j)} / \lambda_j^n$ , где  $\lambda_{(k,j)}$  - интенсивность пакетов, поступивших в канал  $k$  от пользователя  $j$ ;  $\lambda_j^n$  - интенсивность пакетов от пользователя  $j$  в сети.

2. Вероятность передачи пакетов от канала  $k$  к каналу  $h$ :  $P_{(k,h)}^k = \lambda_{(k|h)} / \lambda_k^k$ , где  $\lambda_{(k|h)}$  - интенсивность пакетов в канале  $h$ , прошедших через канал  $k$ ;  $\lambda_k^k$  - полная интенсивность пакетов в канале  $k$ .

3. Вероятность передачи пакетов от канала  $k$  к пользователю  $j$ :  $P_{(k,j)}^o = 1 - \sum_{h \in N} P_{(k,h)}^k$ , где  $N$  - множество каналов связи, непосредственно связанных с каналом  $k$ .

4. Средний интервал времени между поступающими пакетами от пользователя  $j$  в СПД:  $\bar{\tau}_j = 1 / \lambda_j^n$ .

5. Среднее время передач пакетов в каналах связи  $k$ :  $\bar{b}_k = l_n / C_k$ , где  $l_n$  - средняя длина пакета,  $C_k$  - пропускная способность канала  $k$ .

Кроме рассчитанных параметров для имитационной модели СПД дополнительно необходимо задать следующие параметры:

а) законы распределений интервалов времени между поступающими пакетами от пользователей в СПД с коэффициентами вариации этих распределений;

б) законы распределений времени передачи пакетов в КС с коэффициентами вариации этих распределений.

Отметим, что имитационная модель СПД предназначена для детального анализа характеристик функционирования сети, спроектированной в процессе аналитического моделирования. При этом, в случае отличия реального характера процессов поступления пакетов в сеть или передачи пакетов по каналам связи от экспоненциального, в имитационной модели предусмотрена возможность варьирования законов распределения времени передачи (длительностей обслуживания) пакетов в каждом из КС, а также законов распределения интервалов времени между поступающими в сеть пакетами. В качестве таких законов в работе

использовались следующие распределения: экспоненциальный, детерминированный; гипоекспоненциальный разного порядка и, соответственно, с разными коэффициентами вариации; равномерный; экспоненциальный с ненулевыми смещениями; гиперэкспоненциальный; Гамма-распределение.

Аналогично разработано средство исследования временных характеристик канала связи путем генерирования имитационной модели канала связи в виде СМО типа G/G/1 на языке GPSS World с возможностью изменения загрузки канала и варьирования законов распределения интервалов времени между пакетами и времени передачи пакетов по каналу. Данное средство позволяет получить значения временных характеристик канала связи и оценить погрешность аналитических методов расчета характеристик канала связи.

Сформулирована методика исследования распределенной СПД с неоднородным трафиком, которая содержит следующие этапы.

1. Подготовка исходных данных для программного комплекса "DCNET":
  - а) количество узлов сети и их взаимное расположение;
  - б) нагрузка СПД, создаваемая пользователями при работе с прикладными программами, наборами данных и в процессе обмена сообщений;
  - с) ограничения на среднее время доставки пакетов или на стоимость СПД;
  - д) максимальная длина пакета;
  - е) выбор типа каналов и задание стоимостных коэффициентов КС.
2. Расчет оптимальных пропускных способностей типовых топологий СПД при заданных следующих параметрах:
  - а) типовая топология: звезда, кольцо, дерево, полносвязная;
  - б) модель взаимодействия пользователей сети: RDA (Remote Data Access), DBS (DataBase Server) и AS (Application Server);
  - с) распределение прикладных программ и наборов данных по узлам СПД;
  - д) метод маршрутизации.

После задания этих параметров рассчитываются оптимальные значения пропускных способностей КС, время передачи пакетов и загрузки каналов.

3. Расчет пропускных способностей КС при распределенных топологиях
4. Выбор наилучшей топологии СПД, для которой выбранная в зависимости от постановки задачи в качестве критерия эффективности характеристика СПД (среднее время доставки пакетов или стоимость СПД) принимает наименьшее значение.
5. Варьирование параметров и характеристик КС и СПД и выбор дискретных значений пропускных способностей.
6. Оценка погрешностей аналитических методов расчета характеристик КС.
7. Оценка влияния характера потоков пакетов и длительности передачи данных на характеристики СПД:

- a) влияние третьего момента распределения входного потока пакетов на характеристики КС;
- b) влияние длины пакетов на характеристики каналов связи и СПД;
- c) влияние законов распределений трафика в сетях и времени передачи пакетов в КС на характеристики функционирования СПД.

8. Исследование СПД при разных размещениях прикладных программ и наборов данных.

9. Детальный анализ спроектированной СПД, предполагающий варьирование параметров СПД, в том числе: длины запросов и ответов прикладных программ и наборов данных, вероятность передачи по основному пути, способы маршрутизации и т.д.

Результативность предложенной методики иллюстрируется на примере проектирования и исследования корпоративной сети, объединяющей 5 локальных вычислительных сетей.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Разработан метод сведения неоднородного потока пакетов в СПД к однородному и перерасчет параметров пакетов на основе параметров сообщений, при этом ключевой задачей является разработка метода расчета интенсивностей потоков пакетов в каналах связи с учетом топологии СПД, метода маршрутизации, способа распределения по узлам прикладных программ и наборов данных, способа взаимодействия пользователей, длин сообщений и пакетов.

2. Проведен анализ влияния длины пакетов, характера трафиков в сетях (влияния законов распределений) и скорости передачи пакетов в каналах связи на характеристики функционирования СПД. Показано, что погрешность результатов расчета характеристик в предположении о неограниченной длине пакетов может достигать десятков процентов. Варьирование законов распределений времени передачи пакетов в каждом из каналов связи, интервалов времени между поступающими в сеть пакетами и коэффициентов вариации этих распределений позволило выявить ряд свойств и закономерностей, на основе которых сформулированы рекомендации для проектирования СПД такого класса.

3. Разработанный программный комплекс для проектирования и исследования СПД позволяет решать следующие актуальные задачи: оптимизация пропускных способностей каналов связи СПД при ограничениях на время доставки пакетов или на стоимость сети с учетом специфических особенностей реальных СПД; выбор дискретных значений пропускных способностей на основе полученных непрерывных значений; оценка погрешностей аналитических методов расчета модели канала передачи данных с использованием имитационного моделирования.

4. Разработан и программно реализован способ автоматического построения имитационных моделей в среде GPSS World, предназначенных

для детального анализа характеристик функционирования канала связи и спроектированной в процессе аналитического моделирования сети, что позволяет обеспечить адекватность модели реальной СПД, а также проанализировать влияние различных законов распределений интервалов времени между пакетами и времени передачи пакетов по каналам на характеристики СПД.

5. Разработанная методика исследования СПД позволяет проектировщикам при минимальных затратах времени и материальных ресурсов найти рациональные решения по разработке новых и модернизации существующего СПД на основе совместного использования программного комплекса "DCNET" и системы имитационного моделирования GPSS World.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нгуен Дык Тай. Оценка пропускных способностей каналов связи распределенных сетей передачи данных // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Вып. 39. – С. 258 – 267.
2. Нгуен Дык Тай. Оценка пропускных способностей каналов связи распределенных сетей передачи данных // Сборник тезисов межвузовской конференции молодых ученых. СПбГУ ИТМО, 2007 г., с. 55.
3. Нгуен Дык Тай. Оценка погрешностей аналитических методов расчета и исследование СМО типа G/G/1 // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2007). –СПб., 2007. Том 2. -С. 200 – 204.
4. Алиев Т.И., Нгуен Дык Тай. Программный комплекс аналитического и имитационного моделирования сетей передачи данных. // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2007). –СПб., 2007. Том 2. –С. 11 – 16.
- 5. Нгуен Дык Тай. Исследование сетей передачи данных с учетом ограниченной длины пакетов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, июль-август 2008. Вып. №56. – С. 73 – 80.**
6. Нгуен Дык Тай. Исследование неэкспоненциальных моделей сетей передачи данных. // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). –СПб., 2009. Том 2. –С. 182 – 186.
7. Соснин В.В., Нгуен Дык Тай. Анализ характеристик передачи пакетов через Интернет. // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). –СПб., 2009. Том 2. –С. 245 – 249.