

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ**

На правах рукописи

САЛАМЕХ НЕМЕР

**АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СКОРОСТИ
ЗВЕНЬЕВ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ ПРИ СОВМЕСТНОМ
ОБСЛУЖИВАНИИ НЕОДНОРОДНОГО ТРАФИКА
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Степанов Сергей Николаевич

Москва – 2016 г.

Аннотация

Диссертация посвящена разработке моделей и алгоритмов оценки пропускной способности звеньев мультисервисной сети связи при совместном обслуживании заявок на передачу неоднородного трафика реального времени. Для решения сформулированной задачи процессы поступления и обслуживания заявок представлены математической моделью в виде многомерного марковского процесса. При разработке модели учитывается общий вид топологии сети; многопоточный характер поступления заявок на передачу трафика сервисов реального времени; зависимость поступления заявок от потребности в ресурсе передачи (пуассоновская модель для низкоскоростного трафика, модель Энгсета для высокоскоростного трафика), зависимость вероятности допуска заявки к обслуживанию от наличия необходимого свободного ресурса и от степени его загрузки. Сформулированы определения основным характеристикам качества совместного обслуживания заявок. В общем случае значения характеристик оценивались с использованием имитационного моделирования или с помощью приближенного метода, основанного на процедуре просеивания потока поступающих заявок. Исследован частный случай анализируемой модели, который представляет из себя двухпоточную модель звена мультисервисной сети.

Для оценки характеристик модели предлагается использовать алгоритм, основанный на решении системы уравнений равновесия итерационным методом Гаусса-Зейделя. Разработана процедура оценки скорости звеньев мультисервисной сети связи, в которой допускается наличие потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени от конечных групп пользователей и возможность применения процедур резервирования ресурса передачи информации для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика мультимедийных приложений. Проведено численное исследование условий совместного обслуживания неоднородного трафика.

Построенная модель и разработанные на ее основе расчетные алгоритмы использованы при организации учебного процесса кафедры "Сети связи и системы коммутации" и в компании SYRIAN TELECOM при проведении мероприятий, направленных на повышение эффективности работы инфраструктуры сети связи г. Дамаска, Сирийской Арабской Республики.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение	8
Глава 1	
Анализ особенностей построения и развития мультисервисных сетей связи.....	13
1.1. Введение.....	13
1.2. Основные компоненты мультисервисных сетей.....	15
1.3. Архитектура мультисервисных сетей.....	16
1.4. Характеристики и свойства технологии передачи информации MPLS.....	18
1.5. Инфокоммуникационные сервисы и их свойства.....	22
1.6. Характеристики качества передачи трафика.....	24
1.7. Планирование пропускной способности звеньев сети.....	27
1.8. Обзор исследований по тематике диссертационной работы.....	35
1.9. Выводы и постановка задачи исследования.....	37
Глава 2	
Построение и анализ обобщенной модели мультисервисной сети связи.....	39
2.1. Введение.....	39
2.2. Моделирование процессов поступления и обслуживания заявок в сетях связи	40
2.2.1. Единица канального ресурса.....	40
2.2.2. Модель поступления заявок.....	43

2.2.3. Модель занятия канального ресурса.....	44
2.2.4. Формализованное описание топологии сети.....	45
2.2.5. Математическое описание модели.....	49
2.2.6. Определение характеристик обслуживания заявок.....	52
2.2.7. Оценка характеристик обслуживания заявок.....	54
2.3. Моделирование реальных особенностей поступления и обслуживания заявок в системах связи.....	56
2.3.1. Конечное число источников заявок.....	56
2.3.2. Конечное число источников заявок: определение и оценка характеристик.....	60
2.3.3. Наличие внутренних блокировок.....	63
2.3.4. Внутренние блокировки: определение и оценка характеристик.....	65
2.4. Имитационное моделирование процесса обслуживания трафика сервисов реального времени.....	68
2.4.1. Имитационная модель.....	68
2.4.2. Оценка характеристик модели сети.....	70
2.5. Примеры расчётов с использованием имитационной модели.....	73
2.6. Выводы.....	82

Глава 3

Алгоритмы расчета характеристик совместного использования ресурса мультисервисных линий связи85

3.1. Введение.....	85
3.2. Оценка характеристик двухпоточковой модели звена с возможностью внутренних блокировок.....	86
3.2.1. Поступление и обслуживание заявок	86
3.2.2. Математическое описание модели звена.....	89

3.2.3. Характеристики качества обслуживания заявок.....	90
3.2.4. Система уравнений статистического равновесия	93
3.2.5. Решение системы уравнений статистического равновесия.....	97
3.2.6. Численный анализ совместного обслуживания заявок.....	98
3.3. Приближенная оценка характеристик мультисервисного трафика при наличии внутренней блокировки	107
3.3.1. Общие положения метода просеивания заявок.....	107
3.3.2. Реализация метода просеивания заявок для сети с внутренними блокировками	111
3.4. Выводы.....	117

Глава 4

Расчет скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени	119
4.1. Введение.....	119
4.2. Процедура оценки скорости звеньев мультисервисной сети.....	120
4.2.1. Структура модели сети.....	120
4.2.2. Исходные данные.....	121
4.2.3. Этапы реализации алгоритма.....	122
4.3. Анализ методов эффективного занятия ресурса звеньев мультисервисной сети при обслуживании трафика реального времени.....	125
4.3.1. Входные параметры сети.....	125
4.3.2. Оценка характеристик совместного обслуживания неоднородного трафика.....	127

4.3.3. Оценка характеристик при наличии механизма резервирования для высокоскоростного трафика.....	131
4.3.4. Оценка характеристик при действии механизма отдельного использования ресурса.....	133
4.3.5. Рекомендации по совместному обслуживанию трафика реального времени в мультисервисных сетях.....	136
4.3.6. Рекомендации по выбору расчетных процедур.....	138
4.3.7. Оценка скорости звеньев сети.....	140
4.4. Выводы.....	143
Заключение.....	145
Список литературы.....	147
Приложение. Акты о реализации результатов диссертационной работы.....	160

Введение

Актуальность темы исследования. Повышение загрузки ресурса мультисервисных сетей связи при сохранении требуемых норм обслуживания трафика является важной задачей, решение которой необходимо для организации эффективной работы сетевой инфраструктуры операторов связи [19,28,30,52,56,90,110]. Известно, что при совместном обслуживании неоднородного трафика коммуникационных приложений реального времени наблюдается перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается применять либо резервирование, либо отдельное занятие ресурса звеньев сети [1–8,14,19,29,52,90,110]. Для теоретического обоснования процедуры выбора конкретного сценария необходима разработка моделей, реализующих эти сценарии, а также алгоритмов расчета характеристик использования ресурса передачи информации.

Таким образом, исследование моделей и алгоритмов оценки характеристик пропускной способности соединительных линий сетей связи, учитывающих особенности поступления и обслуживания мультисервисного трафика, является актуальной задачей, имеющей большое значение для повышения эффективности совместного занятия ресурса передачи информации. Ее решение позволит менеджменту телекоммуникационных компаний получить теоретическое обоснование проводимым мероприятиям, направленным на повышение качества работы мультисервисных сетей связи при совместном обслуживании неоднородного трафика сервисов реального времени.

Степень разработанности темы. Поставленная задача решается на базе моделей и методов теории телетрафика, а также возможностей, заложенных в механизмы управления процессом совместного обслуживания трафика в современных мультисервисных сетях связи. Различным аспектам решения этой задачи посвящены работы российских и зарубежных авторов Башарина Г.П., Гольдштейна Б.С., Ершова В.А., Кучерявого А.Е., Пшеничникова А.П., Рослякова А.В., Степанова С.Н., Самуйлова К.Е., Соколова Н.А., Цитовича И.И., Клейнрока Л., Iversen V., Ross K., Virtamo J. и др. [3,11,16,24,25,28,34,43,51,52,56,59,60,74,77,79,90,94,110].

Отдельные вопросы построения и исследования моделей линий концентрации мультисервисного трафика рассматривались в диссертационных исследованиях: Дибби В.Н., До Суан Тху., Тимошина М. М., Широкова В. Л., Щека А.Ю. [17,18,58,61,63] и др. авторов, в частности, в работе Щека А.Ю. исследовалось обслуживание трафика реального времени, образованного конечным числом пользователей. Анализ этих и других опубликованных результатов показывает актуальное с точки зрения практики направление исследований, которое еще не получило достаточного отражения в теоретических публикациях, посвященных данной теме. Речь идет о моделях мультисервисных сетей связи, одновременно учитывающих зависимость поступления заявок от типа трафика и наличия механизмов резервирования ресурса передачи информации.

Цели и задачи исследования. Построение и исследование модели мультисервисной сети связи с учетом зависимости поступления заявок от потребности в ресурсе передачи и степени его загрузки; разработка алгоритмов оценки характеристик пропускной способности модели; разработка методики оценки скорости соединительных линий сети, достаточной для обслуживания поступающих заявок с заданным качеством.

Научная новизна.

1. Исследована математическая модель процесса совместного обслуживания неоднородного трафика реального времени в мультисервисных сетях. В модели учитывается: зависимость поступления заявок от потребности в ресурсе передачи (пуассоновская модель для низкоскоростного трафика, модель Энгсета для высокоскоростного трафика); зависимость вероятности допуска заявки к обслуживанию от величины свободного ресурса и от степени его загрузки.

2. Даны формальные определения основным показателям совместного обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Среди них для каждого из рассмотренных видов трафика: доля потерянных заявок, средний объём занятого канального ресурса. Величины характеристик выражены через значения стационарных вероятностей пребывания модели в состояниях с различным числом заявок каждого из рассмотренных видов, находящихся на обслуживании. В общем случае значения характеристик оценивались с использованием имитационного моделирования или с помощью приближенного метода, основанного на процедуре просеивания потока поступающих заявок.

3. Исследован частный случай модели с двумя потоками неоднородного трафика реального времени. Построен алгоритм оценки показателей совместного обслуживания заявок, основанный на составлении и решении системы уравнений равновесия итерационным методом Гаусса-Зейделя. Показано, что построенный алгоритм прост в реализации, и может быть использован практически для всех значений входных параметров.

4. Разработана процедура оценки скорости звеньев мультисервисной сети связи, в которой допускается наличие потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени от конечных групп пользователей и возможность применения процедур резервирования ресурса передачи информации для

преимущественного обслуживания трафика высокоскоростных мультимедийных приложений. Проведено численное исследование условий совместного обслуживания неоднородного трафика реального времени.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в построении и исследовании модели мультисервисной сети, в которой учтена зависимость поступления и обслуживания заявок от потребности в ресурсе передачи и зависимость вероятности допуска заявки к обслуживанию от величины необходимого свободного ресурса и от степени его загрузки. Общий характер предположений позволяет применять математическую модель и созданные на ее основе расчетные алгоритмы для большинства практически важных задач. Разработанный инструментарий рекомендуется использовать при проектировании и эксплуатации мультисервисных сетей связи. Методы оценки пропускной способности мультисервисных сетей, разработанные соискателем, были использованы в компании SYRIAN TELECOM при проведении мероприятий, направленных на повышение эффективности работы инфраструктуры сети связи г. Дамаска, Сирийской Арабской Республики, а также в учебном процессе на кафедре "Сети связи и системы коммутации" (ССиСК) Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ). Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами, которые приведены в Приложении.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи применяются методы теории телетрафика, теории вероятностей и вычислительной математики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Анализ публикаций и опыта эксплуатации мультисервисных сетей связи показал, что при совместном обслуживании неоднородного трафика коммуникационных приложений реального времени наблюдается

неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается применять либо резервирование, либо отдельное использование ресурса звеньев сети.

2. Построенная модель мультисервисной сети связи адекватно отражает особенности формирования неоднородного трафика реального времени и дает возможность анализировать результаты применения механизмов резервирования и отдельного использования ресурса передачи информации для повышения эффективности его занятия.

3. Разработанные точные и приближенные алгоритмы позволяют находить значения характеристик передачи трафика современных инфокоммуникационных приложений и использовать полученные результаты для анализа свойств совместного обслуживания заявок на передачу неоднородного трафика реального времени.

4. Предложенные правила выбора начальных значений скорости передачи звеньев сети и процедура их последовательного увеличения, основанная на анализе характеристик реализации алгоритма просеивания поступающих заявок, дает возможность рассчитать требуемую величину ресурса линий сети с учетом особенностей формирования и обслуживания неоднородного трафика приложений реального времени.

5. Разработанные модели и алгоритмы рекомендуется использовать в научно-исследовательских и проектных организации для решения задач оценки величины ресурса передачи информации мультисервисных линий при совместной передаче неоднородного трафика сервисов реального времени.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные теоретические результаты обоснованы применением математических методов теории телетрафика, подтверждены численными экспериментами.

Достоверность положений и выводов диссертации подтверждается апробацией работы, основные результаты которой обсуждались и докладывались на международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2010, 2014гг.», на конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, РУДН, 2011, 2012, 2013 гг.), на отраслевой научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (Москва, МТУСИ, 2015 г.), на научной сессии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, посвященной дню Радио (М., РНТОРЭС, 2011, 2012, 2013 гг.), на кафедре ССиСК МТУСИ. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России.

Глава 1

Анализ особенностей построения и развития мультисервисных сетей связи

1.1. Введение

Телекоммуникационные сети развиваются в направлении создания условий для предоставления пользователям услуг связи неограниченного набора сервисов с требуемыми характеристиками качества обслуживания. Решение перечисленных задач осуществляется на базе пакетных технологий передачи информации. Теоретические положения, необходимые для их решения, сформулированы в рамках концепции сетей связи следующего поколения NGN (Next Generation Networks) [1,2,10,20,27,64,91,110].

Из этих положений следует, что мультисервисной сетью называется сеть связи с обслуживанием трафика разнообразных инфокоммуникационных приложений на основе пакетных технологий транспортировки информации, обеспечивающих требуемые характеристики качества обслуживания абонентов. В состав перечисленных пакетных технологий в первую очередь относится протокол IP, обеспечивающий сквозную адресную передачу информационного потока, но без гарантии качества, и технология MPLS [4,10,14,31,39,42,47,48,49,70,79,81,82,83], которая совместно с механизмами поддержки качества типа DiffServ и IntServ, позволяет решить задачу предоставления необходимых характеристик качества обслуживания. Перечисленные технологии, протоколы и процедуры поддержки качества в последующих разделах главы будут рассмотрены с большей детальностью.

Как уже было сказано, основной задачей мультисервисных сетей является обеспечение технических возможностей предоставления пользователю разнообразных инфокоммуникационных услуг. Расширение спектра услуг

приводит к появлению сервисов, требующих существенно большую скорость передачи информационного потока нежели традиционные услуги голосовой связи. Отметим, что эти услуги развиваются более быстрыми темпами. Достаточно отметить передачу видеоинформации высокой точности. Эта услуга является составной частью внедрения масштабных телекоммуникационных проектов типа электронное правительство, электронная торговля, телеобучение, телемедицина, обеспечение общественной и личной безопасности [53,56].

В большинстве случаев построение мультисервисной сети происходит не с нуля, а в результате последовательной конвергенции сетей мобильной и фиксированной связи на основе развития инфокоммуникационных технологий передачи информации, механизмов управления процессом приема и транспортировки данных с помощью интеллектуальных компьютерных программ и протоколов. Пример архитектуры подобной сети показан на рисунке 1.1.

Важной особенностью построения мультисервисных сетей является увеличение роли протокола IP. Дополненный функциональностью механизмов поддержки качества обслуживания типа DiffServ и IntServ он дает возможность предоставить абоненту требуемое качество обслуживания.

Часто решение задачи построения мультисервисной сети связи необходимо осуществлять в рамках действующей сети при сохранении объема и качества предоставления традиционных услуг по передаче голоса и данных. Совместная передача разнородного трафика разнообразных коммуникационных приложений в общей среде пересылки информации может привести нарушению обязательств оператора перед пользователями услуг связи. Теоретический анализ этой проблемы и пути выхода из нее станут предметом исследования в диссертационной работе.

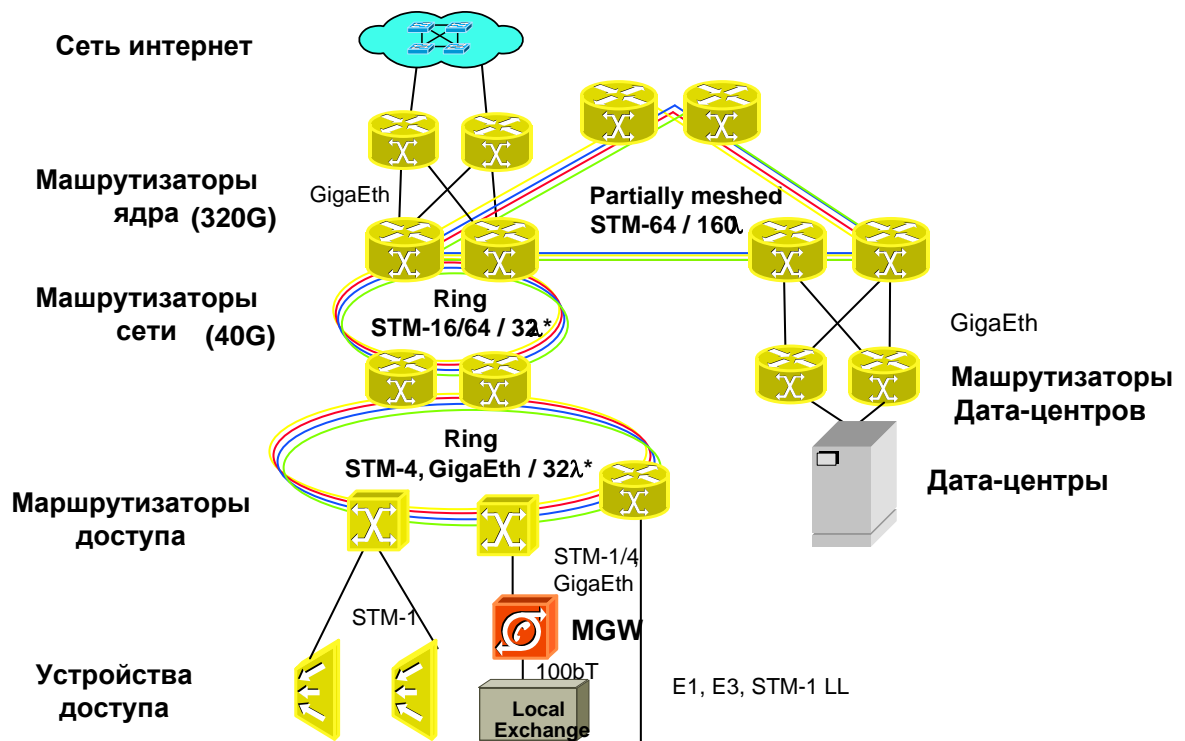


Рис. 1.1. Пример архитектуры мультисервисной сети

1.2. Основные компоненты мультисервисных сетей

Приведем краткие сведения об основных структурных компонентах мультисервисных сетей связи. К таковым в первую очередь относится гибкий коммутатор (Softswitch). Он осуществляет действия по маршрутизации информационного потока, связанного с обслуживанием поступившей заявки. В перечень действий также относится сбор и анализ статистических данных по установлению соединения и последующей транспортировке информации, а также ее тарификации. Другим важным устройством являются шлюзы доступа (Gateways). Здесь происходит преобразование сигнальной информации и передаваемого трафика пользователей в нужный формат. Дополнительные коммуникационные сервисы реализуют серверы приложений. Терминальные устройства выполняют функции подключения пользователей к мультисервисной сети. При этом используются протоколы SIP или H.323.

[1,2,6 – 8,10,20] Часть перечисленных компонент и функций показана на рисунках 1.1 и 1.2.

При построении моделей мультисервисных сетей связи и их последующем теоретическом анализе число рассматриваемых структурных компонент уменьшается до двух: узел и линия. Узел реализует действия, направленные на маршрутизацию потоков трафика, связанных с обслуживанием поступающих заявок, а линия используется для передачи трафика между двумя узлами. Далее будет предполагаться, что узлы обладают неограниченной пропускной способностью и отсутствием сбоев в обработке и передаче трафика. Таким образом, узким местом сети, требующем оценки необходимого объема ресурса передачи информации являются соединительные линии.

Информация передается в сети с использованием пакетных технологий. Предполагается, что передаваемый трафик инициирован предоставлением сервисов реального времени [15,26,27,39–51,72,73] или сервисов передачи данных, обслуживаемых на условиях обработки сервисов реального времени.

Для передачи информационного потока должно быть предварительно установлено соединение. Оно устанавливается после поступления заявки от пользователя услуг связи для пересылки информационного потока, инициированного ее обслуживанием. Информационный поток характеризуется необходимой скоростью передачи и длительностью промежутка времени, когда ресурс передачи информации предоставляется пользователю.

1.3. Архитектура мультисервисных сетей

Анализ особенностей построения архитектуры мультисервисной сети показывает, что она реализована на принципах многослойных систем. Отдельные слои будь то доступ, транспорт, приложения отвечают за реализацию функций своего слоя. Каждый слой может развиваться независимо

от других слоев. Связь между отдельными слоями реализуют специально разработанные интерфейсы. Многослойная архитектура мультисервисной сети в соответствии с рекомендациями ITU показана на рисунке 1.2.

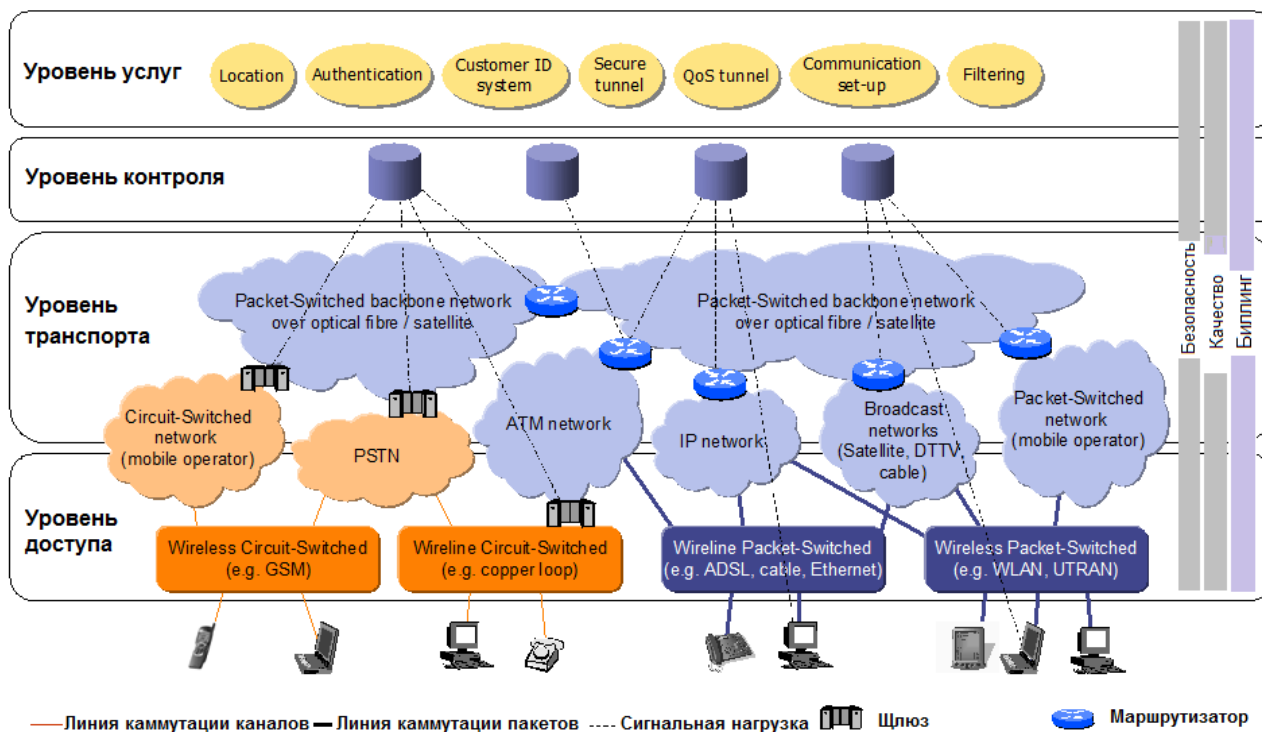


Рис. 1.2. Архитектура мультисервисной сети в соответствии с рекомендациями ITU

Из принципов построения открытых систем следует, что архитектура сети связи нового поколения должна обладать модульной структурой с физическим и логическим разделением транспортного уровня, уровня доступа, а также уровней услуг и управления услугами. Основной задачей уровня доступа и транспортного уровня является реализация функций коммутации и прозрачной передачи трафика, инициированного обслуживанием заявки пользователя услуг связи [72,74,84–92].

Понятно, что основными функциями уровня управления коммутацией и пересылкой информации является обработки сигнальной информации,

связанной с маршрутизацией трафика, инициированного обслуживанием заявки абонента. Функции управления предоставлением разного рода инфокоммуникационных сервисов и приложений сосредоточены в уровне управления услугами [64,66].

Как показывает вид сетей, приведенных на рисунках 1.1 и 1.2, для них характерна иерархическая структура: уровень доступа, уровень распределения и верхний уровень, так называемое ядро сети. На уровне доступа происходит формирование трафика, поступающего в сеть для последующей передачи в соответствии с адресом назначения. Здесь также реализуются функции контроля за приемом поступающих заявок на обслуживание. В этом участке сети для передачи трафика в основном используется технология Ethernet, но также могут применяться технологии xDSL и разнообразные виды доступа по беспроводным технологиям. На уровне распределения выполняются действия по агрегации и мультиплексированию трафика. В ядре сети реализуются функции, направленные на высокоскоростную передачу сетевого трафика. Обычно в этой части сети при ее проектировании используются сценарии с избыточной пропускной способностью. В отличие от уровня доступа, где избыточная пропускная способность сильно завышает стоимость сети. В этом участке сети для передачи трафика используется технология Ethernet, синхронная цифровая иерархия (SDH), спектральное уплотнение WDM и DWDM.

1.4. Характеристики и свойства технологии передачи информации MPLS

Телекоммуникационные сети, построенные на базе протокола IP, не имеют развитых средств управления трафиком и ограничены в организации альтернативных маршрутов его передачи. Для устранения этих недостатков разработана технология многопротокольной коммутации в соответствии с

метками (MPLS, Multi-Protocol Label Switching), объединяющая в себе достоинства методов пакетной коммутации (высокая производительность) и маршрутизации (выбор оптимального маршрута), которые ранее использовались в ATM. Технология MPLS представляет из себя эффективный способ передачи данных по сети с применением информации, содержащейся в метках, которые присоединяются к IP-пакетам. Словосочетание «*многопротокольная*» означает, что функции MPLS могут быть применены к любому протоколу сетевого уровня [14,31,33,39,42,47–50,72,79].

Использование коммутации по метке в IP-сетях дает следующие преимущества :

- Возможность построения VPN в магистральных сетях 3-го уровня для большого количества абонентов, используя при этом общую инфраструктуру.
- Возможность перераспределения информационных потоков, которая позволяет оптимизировать занятие полосы пропускания на недостаточно загруженных маршрутах
- Возможность реализации в VPN-сетях различных классов обслуживания с надежными гарантиями QoS.
- Возможность интеграции IP и ATM.

Внедрение MPLS повышает уровень предоставления сервиса, для корпоративных клиентов, включая создание VPN. Наличие MPLS VPN позволяет соединять узлы по принципу «каждый с каждым» независимо от технологии доступа. Это повышает производительность и масштабируемость сети, а также надежность маршрутизации информационных потоков. С технологией MPLS хорошо сочетается Ethernet, это позволяет предоставить широкополосные услуги в городских сетях доступа. Стек протоколов MPLS содержит протоколы сигнализации и маршрутизации. Протокол LDP (рисунок

1.3) применяется для преобразования путей, созданных протоколами маршрутизации OSPF, RIP и IS-IS, в пути коммутации меток. При этом протокол LDP выделяет метку для каждого соединения до данного адресата. В точках сети, где маршруты сходятся, метки объединяются.



Рис. 1.3. Стек протоколов MPLS

Протокол распределения меток LDP (Label Distribution Protocol) предназначен для построения маршрутов коммутации по меткам (LSP, Label Switched Path). Рассмотрим, как MPLS строит путь LSP с помощью протокола LDP. С помощью многоадресной рассылки сообщений маршрутизаторы определяют свое «соседство» (adjacency) в рамках протокола LDP. После два соседа обмениваются информацией для инициализации соседства. После установления соседства, протокол LDP начинает транспортное соединение между участниками сеанса поверх TCP. Участники соединения передают свои запросы на установку привязки. Они также периодически проверяют работоспособность соединения. Если после получения последнего контрольного сообщения проходит достаточно большое время, то соединение разрывается.

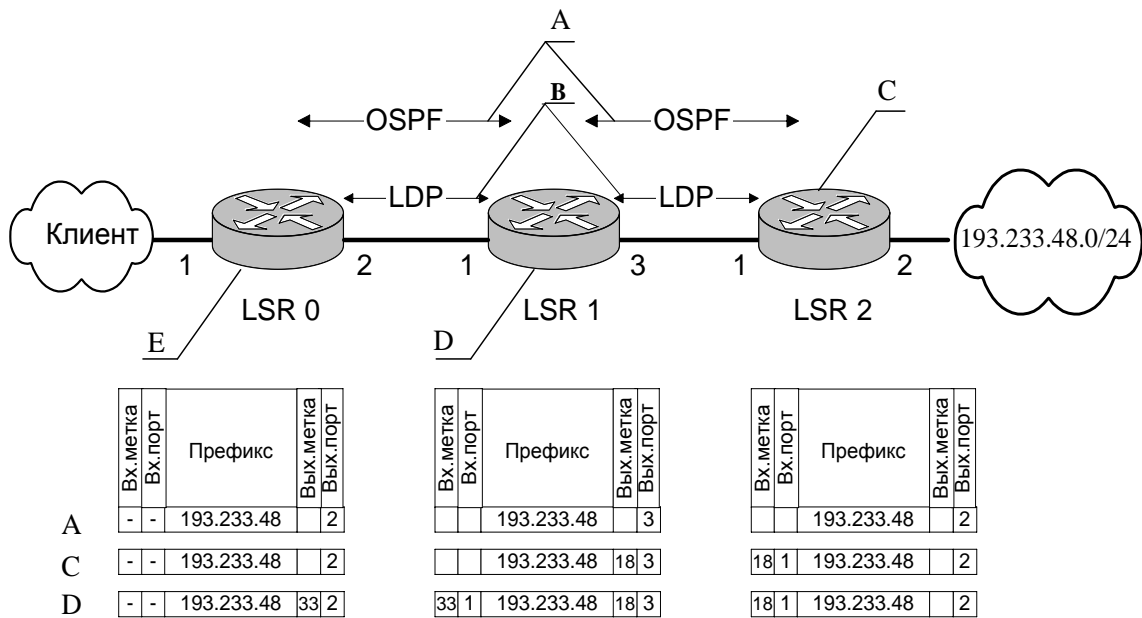


Рис. 1.4. Построение коммутируемого пути по протоколу LDP

На рисунке 1.4 по данным [10,32,33] представлен пример заполнения таблиц меток по протоколу LDP.

При формировании таблицы маршрутизации используются следующие два подхода:

- *статическая маршрутизация* – в этой ситуации записи в таблице вводятся и изменяются вручную;
- *динамическая маршрутизация* – в этой ситуации записи в таблице обновляются автоматически при помощи одного или нескольких протоколов маршрутизации – OSPF, IS-IS и др.

Сеть MPLS делится на две функционально различные области – ядро сети и граничную область. Маршрутизаторы ядра сети занимаются только коммутацией потоков. Все функции классификации поступающих пакетов по различным FEC, а также реализацию таких дополнительных опций, как фильтрация, явная маршрутизация, выравнивание трафика и управление им, берут на себя граничные маршрутизаторы (LER, Label Edge Router). В результате основной объем вычисления приходится на граничную область

сети, а высокопроизводительная коммутация выполняется только в ядре сети. Это позволяет оптимизировать работу сети MPLS.

Для решения задачи управления трафиком в протоколы OSPF и IS-IS включены новые типы объявлений для пересылки по сети информации о номинальной и незарезервированной (доступной для потоков управления трафиком) пропускной способности каждой соединительной линии [32,33,41,42].

1.5. Инфокоммуникационные сервисы и их свойства

В действующих и перспективных мультисервисных сетях работа по предоставлению услуг представлена на трех уровнях в соответствии с многослойной структурой сети [27,66,71,72]. Для передачи информационных потоков, ассоциированных с обслуживанием заявки, используется транспортный уровень. Пересылка сигнальной информации выполняется на уровне сигнализации. Предоставление коммуникационных сервисов, которые не входят в состав пакета базовых услуг, происходит на уровне услуг. В соответствии с принципами открытых систем процесс развития каждого уровня предоставления сервисов может выполняться независимо друг от друга. Связь между уровнями осуществляется через интерфейсы.

В соответствии с принципами построения мультисервисных сетей [2] предоставляемые услуги делятся на две группы: услуги переноса информации и просто инфокоммуникационные услуги. Сервисы, входящие в состав первой группы, обеспечиваются транспортной сетью и состоят в прозрачной пересылке информации пользователя между сетевыми окончаниями без осуществления действий по обработке переносимой информации. Сервисы, включенные во вторую группу, предоставляются по принципу "клиент-сервер". При этом используется оборудование пользователя услуг связи (клиента) и сервера, которое локализовано в одном из сетевых узлов.

Услуги переноса, ориентированные на установление соединения, реализуются в режиме эмуляции прямых соединений с использованием возможностей пакетных технологий ATM, MPLS и подобных им [14,16]. Здесь в основном речь идет о передаче трафика сервисов реального времени или передаче трафика данных на условиях трафика сервисов реального времени. Услуги переноса, не ориентированные на установление соединения, реализуются на базе протоколов IP и Ethernet.

В процессе предоставления инфокоммуникационных услуг выполняется пересылка мультимедийной информации. Здесь возможны несимметричность объема прямого и обратного трафика. Может возникнуть необходимость установления многоточечных соединений, преобразования пересылаемой информации, аутентификации пользователя, управления процессом предоставления услуги со стороны пользователя. В контексте обсуждения инфокоммуникационных услуг часто используется понятие *приложение*, под которым понимается услуга с функциональностью распределенной между оборудованием поставщика услуги и пользовательским оборудованием. К мультимедийным услугам относятся: видеоконференции, сбор и накопление мультимедийного контента, услуги с выборкой информации, услуги с распределением информации, передача сообщений и т.д. Перечисленные услуги являются составной частью внедрения масштабных телекоммуникационных проектов типа электронное правительство, электронная торговля, телеобучение, телемедицина, обеспечение общественной и личной безопасности.

Технологические аспекты предоставления перечисленных услуг в рамках реализации концепции NGN заключаются в независимости условий предоставления услуг связи от используемых технологий передачи информации, в возможности участия нескольких операторов в процессе предоставления услуги; в возможности динамического распределения

используемых ресурсов в зависимости от потребностей пользователя услуг связи, текущего состояния сети и действующих процедур контроля за передачей информации; пересылка всех типов трафика на базе пакетной коммутации; возможность доступа абонентов сети к различным, в том числе конкурирующим провайдерам услуг и т.д.

При этом усилия операторов будут в меньшей степени связаны с развитием сетевой инфраструктуры, а в большей – с созданием механизмов предоставления инфокоммуникационных сервисов и обеспечением доступа пользователей услуг связи к сервисам нового типа. Движение в этом направлении позволит операторам увеличить получаемые доходы несмотря на снижение доходов от предоставления пакета базовых услуг.

1.6. Характеристики качества передачи трафика

Оценка характеристик качества передачи трафика, ассоциированного с обслуживанием поступающих заявок, является достаточно сложной задачей. Сложность связана со сложным характером исследуемого объекта. Анализ процесса передачи информационного потока можно вести с разной степенью детальности [26,52,56,66]. Из имеющегося множества характеристик следует выделить несколько основных интегральных характеристик, которые с общих позиций оценивают качество обслуживания абонентов и могут применяться для оценки величины необходимого ресурса звеньев сети. При этом другие характеристики могут использоваться для более тонкого анализа процесса обслуживания поступающих информационных потоков. Есть несколько вариантов реализации сформулированной идеи.

Инфокоммуникационные сервисы, представленные в каждой группе (классе), обладают следующими свойствами

Класс 0 — потоки реального времени, отличающиеся высокой степенью интерактивности и чувствительности к задержке

Класс 1 — потоки реального времени, интерактивные и чувствительные к вариации задержки (аудио- и видеосвязь)

Класс 2 — транзакции данных, с высокой степенью интерактивности (передача сигнальной информации).

Класс 3 — транзакции данных, интерактивные

Класс 4 — потоки, чувствительные к потере информации (массивы данных, потоковое видео).

Класс 5 — традиционные приложения IP-сетей с характеристиками передачи по принципу Best Efforts.

Перечисленные сегменты в разделении инфокоммуникационных сервисов обычно используются при анализе информационных потоков на уровне пересылки отдельных пакетов. В этой ситуации поступающие потоки обычно демонстрируют наличие свойств самоподобности и долговременной зависимости [38,62]. Это означает, что при построении моделей входных потоков нельзя использовать пуассоновские потоки и соответственно марковские процессы. В соответствии с рекомендациями МСЭ Y.1541, инфокоммуникационные сервисы разделены на группы в зависимости от показателей пересылки IP-пакетов: задержки доставки, вариации задержки доставки, доли потерянных пакетов и доли пакетов, переданных с ошибкой.

Численные характеристики принадлежности сервисов к группам приведены в таблице 1.1. взятой из Y.1541.

Таблица 1.1. Характеристики принадлежности сервисов к группам в соответствии с У.1541.

Характеристики доставки IP-пакетов	Классы качества пересылки потоков					
	0	1	2	3	4	5
Задержка доставки IP-пакета, IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1с	Не опр.
Вариация задержки доставки IP-пакета, IPDV	50 мс	50 мс	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Доля потерянных IP-пакетов, IPLR	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	Не опр.
Доля IP-пакетов, переданных с ошибки, IPER	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	Не опр.

Анализ потребности в ресурсе передачи информации проще вести, если рассматривать процесс пересылки трафика на уровне поступления и обслуживания заявок на предоставление требуемого сервиса. В этой ситуации для моделирования процесса поступления заявок можно использовать пуассоновские модели. Этот результат следует из известных теорем [56] о суммировании стационарных, независимых потоков, в каждом из которых

интенсивность поступления заявок стремится к нулю, а в суммарном потоке она стремится к константе. Эта константа определяет интенсивность поступления заявок в анализируемом потоке.

Если предположить, что промежуток времени обслуживания заявки (интервал времени занятия ресурса на передачу информационного потока, относящегося к обслуживанию рассматриваемой заявки), имеет экспоненциальное распределение с параметром, значение которого определяется из величины среднего времени обслуживания заявки, то функционирование модели, т.е. изменение состояния числа заявок одновременно находящихся в системе будет описываться марковским процессом с конечным числом состояний [56]. Сформулированное утверждение позволяет рассчитать значения характеристик с помощью составления и решения системы уравнений равновесия. Эту систему можно решать точными методами для небольшого количества звеньев и узлов или приближенными методами, если речь идет об общем случае [56].

1.7. Планирование пропускной способности звеньев сети

Моделирование процессов поступления и обслуживания заявок должно учитывать основные особенности совместной передачи информационных потоков в действующих и перспективных сетях связи. До недавних пор планирование ресурса передачи информации в действующих сетях связи, в частности, в сети Интернет было основано на использовании разного рода эмпирических правил. Информационные потоки современных коммуникационных приложений существенно отличаются от речевого трафика, что затрудняет, а порою делает невозможным применение классических результатов теории телетрафика [22– 24]. Для устранения отмеченных трудностей требуется ввести в обиход инженеров, занимающихся решением задач проектирования сетей связи, новые модели, а на их основе

разработать новые алгоритмы оценки показателей пропускной способности систем связи. Приведем краткое обсуждение полученных результатов.

В решении задач оценки пропускной способности сети практикуется использование двух подходов. Первый способ основан на концепции неконтролируемого предоставления ресурса передачи информации в соответствии с потребностями пользователей, второй подход, напротив, предполагает усиление роли процедур контроля за совместным использованием ресурса, направленных на повышение эффективности совместной передачи трафика. Первый из упомянутых сценариев планирования сетей в первую очередь основан на убеждении в превышении темпов роста скорости передачи информации, достигаемой в результате внедрения новых и дешевых технологий оптической связи, по сравнению с увеличением объемов передаваемого трафика. Это утверждение по крайней мере в ближайшие несколько лет кажется вполне обоснованным поскольку даже в нынешней сети Интернет трафик сервисов реального времени часто успешно пересылается безо всякого контроля качества [52,56].

Успешной реализации данного подхода также служит оптимальное размещение (кэширование) информации хранимой в сети и запрашиваемой потребителями ее услуг. Также необходимо учесть, что доля трафика реального времени, требующего гарантированных характеристик передачи часто не бывает так велика. Если перед проектировщиками стоит задача обеспечения показателей QoS для трафика, составляющего 10% от общего объема поступающей нагрузки, то дешевле и проще это сделать увеличив на 20% скорости линий связи, нежели внедрив процедуры поддержки QoS, требующие перезагрузки дорогостоящего программного обеспечения.

В локальных сетях определяющим мотивом увеличения скорости передачи часто служит быстрота загрузки содержимого веб-страниц. Потребителю более важно не закачать большой объем данных, а сделать это

быстро. В результате продолжительность загрузки единицы ресурса локальных сетей связи упала за последние десять лет в десять раз.

Выполненное обсуждение показывает, что планирование сетей с избытком пропускной способности имеет ряд преимуществ. Однако утверждать, что этот подход получит повсеместное распространение нельзя. Скорее всего область его применения будет ограничена ядром сети. Сети доступа, особенно те, что были построены с использованием дефицитного радиointерфейса, имеют ограниченный ресурс передачи информации и требуют использования процедур контроля за его распределением между поступающими информационными потоками с тем, чтобы обеспечить заданные показатели качества его обслуживания. В анализируемой ситуации рассматриваются три группы показателей: прозрачность (инвариантность), доступность и получаемая пропускная способность. Первая из отмеченных характеристик отвечает за семантическое и временное единство передаваемой информации. Этот показатель играет существенную роль при передаче данных. При этом задержка в пересылке информации существенной роли не имеет. Доступность представляет из себя вероятность допуска заявки к занятию ресурса. Эта характеристика служит основой при определении необходимой пропускной способности в случае обслуживания речевого трафика. Получаемая пропускная способность является важнейшей характеристикой передачи данных.

Передаваемый трафик можно разбить на две основные группы: трафик реального времени и эластичный трафик передачи данных [52–56]. Информационные потоки, принадлежащие первой группе, характеризуются интервалом времени передачи и скоростью передачи. К потокам данного типа относятся голосовой трафик и трафик, связанный с предоставлением услуг интерактивной передачи видео, в частности видеоконференцсвязи. При обслуживании подобного трафика требуется временная инвариантность и

допускаются незначительные потери, задержка и джиттер в передаче пакетов. Трафик реального времени характеризуется интенсивностью потока поступающих заявок и временем передачи информации пользователя. Качество обслуживания заявок оценивается вероятностью блокировки. Информационные потоки, принадлежащие второй группе, относятся к передаче оцифрованных документов (файлов). Трафик указанного типа называется эластичным поскольку при его пересылке допускается изменение скорости передачи при увеличении или уменьшении незадействованной пропускной способности линии. К потокам данного типа относятся пересылка файлов, содержания веб-страниц и т.п. При обслуживании подобного трафика требуется семантическая инвариантность. Эластичный трафик характеризуется интенсивностью потока поступающих заявок и объемом передаваемой информации. Качество обслуживания заявок оценивается временем скачивания документа и получаемой пропускной способностью.

Рассмотрим действие процедур, направленных на поддержание требуемого качества передачи информационных потоков для каждого из отмеченных типов трафика. Качество обслуживания трафика реального времени обычно контролируется процедурами без обратной связи (open-loop control), основанными на понятии SLA (Service Level Agreement). Последнее представляет собой соглашение между пользователем услуг сети и администрацией сети относительно параметров передаваемого трафика и качества его обслуживания. Эффективность использования подобных процедур существенно зависит от того насколько точно удастся предсказать параметры трафика. Необходимо отметить сложность их оценки. Соответствующая процедура должна быть проста и понятна пользователю, должна эффективно распределять ресурс передачи информации и быть удобной в реализации. Примером подобной процедуры является алгоритм

Leaky bucket . Он прост в реализации, однако мало пригоден для эффективного распределения ресурса передачи.

Большинство процедур, направленных на повышение эффективности использования пропускной способности линий связи, основаны на свойстве мультиплексирования. Этот результат может достигаться при совместном использовании буфера или передаточных возможностей линии. Рассмотрим действие процедуры мультиплексирования более подробно. Реализация самого простого сценария не предполагает использования преимуществ, достигаемых за счет мультиплексирования. В этой ситуации величина требуемой пропускной способности определяется исходя из значений пиковой скорости передачи информации, соответствующей анализируемому типу телекоммуникационного сервиса. Преимуществом данного подхода является тот факт, что в распределении ресурса используется только один параметр – пиковая скорость передачи информации. Процедура допуска новых заявок на обслуживание не вызывает затруднений и сводится к оценке суммарного значения пиковых скоростей передачи информации всех установленных соединений и нового соединения [52,80] . Если полученное значение меньше, чем скорость линии, то заявка принимается к обслуживанию. Если нет, то заявка получает отказ.

Недостатком данного подхода является неэффективное использование ресурса передачи. Для большинства телекоммуникационных приложений интервал времени передачи информации на пиковой скорости составляет достаточно малую часть от общего времени предоставления сервиса. Оценка показателей качества обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени в рассматриваемой постановке осуществляется с использованием семейства многопоточковых моделей с пуассоновскими входными потоками [52,110,111]. Заявки каждого потока требуют для своего обслуживания фиксированный передаточный ресурс линий сети, который не

меняется в процессе передачи информации пользователя и освобождается после завершения обслуживания. Величина выделяемого ресурса определяется на основе значения пиковой скорости передачи информации, соответствующей анализируемому типу телекоммуникационного сервиса.

Результаты численного исследования (эти результаты опубликованы в [52,56,110,111] и в полном объеме будут представлены в следующей главе) процедуры мультиплексирования низкоскоростного и высокоскоростного трафика показали наличие свойства неконтролируемого перераспределения ресурса передачи информации в пользу низкоскоростного трафика. Для устранения отрицательных последствий этого явления можно использовать либо резервирование пропускной способности для обслуживания высокоскоростного трафика, либо разделение потоков низкоскоростного и высокоскоростного трафика и передаче их по отдельным соединительным линиям. Для обоснования процедуры выбора конкретного сценария необходимо провести соответствующее теоретическое исследование с использованием специальным образом построенных моделей и алгоритмов. Эта работа имеет большое значение для практических приложений и будет проделана в последующих главах диссертации.

Следующий сценарий использует возможности статистического мультиплексирования информационных потоков, но без участия в этом процессе буфера (rate envelope multiplexing). В рассматриваемой ситуации допускается некоторое превышение интенсивности потока Λ скорости линии C , не превосходящее заданной вероятности \mathcal{E} : $p(\Lambda > C) < \mathcal{E}$. Избыток поступающих пакетов теряется. Интенсивность потерянных пакетов определяется из выражения:

$$\frac{M(\Lambda - C)^+}{M(\Lambda)}.$$

В приведенном выражении знак + означает, что соответствующая разность больше нуля, а символ M обозначает математическое ожидание. Величина интенсивности потерянных пакетов зависит от стационарных характеристик поступающего потока и не зависит от его свойств, относящихся к используемой шкале времени. Следовательно, при применении данного подхода нет необходимости учитывать корреляцию трафика, т.е. свойство долговременной зависимости. Это упрощает реализацию анализируемой процедуры допуска заявок к обслуживанию. Ясно, что успешное применение данного подхода возможно, если интенсивность потерянных пакетов достаточно мала. К недостаткам процедуры rate envelope multiplexing относится достаточно низкое использование передаточных возможностей линии связи. В анализируемом случае расчет характеристик обслуживания заявок выполняется с помощью семейства многопоточковых моделей с пуассоновскими входными потоками. Заявки каждого потока требуют для своего обслуживания фиксированный передаточный ресурс линий сети, который не меняется в процессе передачи информации пользователя и освобождается после завершения обслуживания. Величина выделяемого ресурса определяется на основе значения эффективной скорости передачи информации, соответствующей анализируемому типу телекоммуникационного сервиса [53,57]. Значение эффективной скорости передачи информации меньше пиковой скорости и больше средней скорости.

Большую выгоду приносит сценарий, в котором возможности статистического мультиплексирования реализуются также и в буфере. Этот

подход носит название rate sharing method или buffered multiplexing. Основная идея состоит в постановке части избыточных пакетов в буфер.

В рассматриваемой ситуации допускается некоторое превышение длины очереди ожидающих пакетов Q порогового значения буфера q , не превосходящее заданной вероятности ε : $p(Q > q) < \varepsilon$. Избыток поступающих пакетов теряется. Понятно, что при использовании данного подхода эффективность занятия ресурса передачи возрастает. Недостатком этой процедуры является сложный характер ее реализации. К тому же наличие долговременной зависимости снижает эффективность его применения.

При передаче эластичного трафика данных используются схемы контроля с обратной связью. Примером реализации подобных процедур является действие протокола TCP/IP. Задачей данного протокола является по возможности полное использование скорости передачи линии связи. Для расчета показателей пропускной способности, а таковыми в данном случае являются средняя продолжительность интервала скачивания, используется семейство моделей с разделением ресурса передачи информации в режиме Processor Sharing [22,23,56,74,75–77]. Для оценки характеристик совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и данных необходимо построить модели, в которых для передачи данных используется весь ресурс, оставшийся свободным от передачи трафика сервисов реального времени.

Выполненное обсуждение показывает, что для оценки характеристик совместной передачи трафика сервисов реального времени наиболее обоснованным является подход, основанный на использовании понятия эффективной скорости передачи информации. Он дает возможность учесть эффект статистического мультиплексирования на шкале времени, относящейся к моментам поступления пакетов и к моментам поступления заявок. Для оценки характеристик качества совместного обслуживания поступающих

заявок можно использовать алгоритмы, вытекающие из наличия свойства мультипликативного представления значений стационарных вероятностей многопоточковых моделей с отказами заблокированных заявок [52,56]. Эти вопросы будут рассмотрены в последующих главах диссертационного исследования. Наличие удобных расчетных алгоритмов позволяет исследовать эффективность мультиплексирования мультисервисного трафика на шкале времен, соответствующей моментам поступления заявок. Численные результаты, иллюстрирующие это свойство, будут рассмотрены в главе 2. Важнейшим понятием, необходимым для применения расчетных моделей является понятие единицы канального ресурса. Оно также будет введено в главе 2.

1.8. Обзор исследований по тематике диссертационной работы

Процесс поступления и обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени анализировался многими авторами [24,37,52,56,111]. Это интерес обусловлен относительной легкостью анализа, вытекающей из возможности использования при проведении вычислений свойство мультипликативности значений стационарных вероятностей. Первые результаты были получены для отдельной модели звена мультисервисной сети связи [110], для которой удалось построить рекурсивный алгоритм оценки стационарных характеристик модели. Этот результат был позднее обобщен на несколько других более сложных моделей звена, в которых учитывались особенности поступления заявок от конечных групп пользователей [110], от наличия ограничения по доступу [91], от реализации возможности резервирования ресурса передачи информации для отдельных потоков [52,56,110].

Одновременно с разработкой точных численных алгоритмов анализа отдельных звеньев шла работа по созданию метода расчета мультисервисных

сетей с отмеченными свойствами [110,111]. Хотя для некоторых моделей сохранилось свойство мультипликативности значений стационарных вероятностей (в частности, для моделей с ограниченным доступом и учетом зависимости входного потока от числа абонентов, участвующих в его формировании), этот результат не привел к появлению точных численных алгоритмов оценки характеристик совместного обслуживания заявок, за исключением сетей, имеющих иерархическую топологию. В последнем случае численный анализ модели можно проводить с помощью алгоритма свертки [91,119]. В общем случае для оценки характеристик используется имитационное моделирование [56] или приближенные алгоритмы, основанные на использовании метода просеивания входного потока заявок [94,110,119]. Эти же подходы будут использованы в диссертационной работе.

Различные аспекты исследования мультисервисных сетей связи рассматривались в диссертационных работах [17,18,60,63,65]. Среди полученных результатов: приближенные алгоритмы оценки характеристик качества совместного обслуживания заявок, имитационные модели и анализ численных результатов, найденных с их использованием. Эти результаты были получены для мультисервисных сетей, в которых учитываются некоторые частные их особенности, например, топология сети или особенности формирования входного потока.

Анализ этих и других результатов, представленных в печати, показывает интересное с точки зрения практических приложений направление исследований, относящееся к теоретическому анализу процедуры мультиплексирования трафика мультимедийных приложений в мультисервисных сетях связи с учетом зависимости поступления заявок от потребности в ресурсе передачи и зависимости вероятности допуска заявки к обслуживанию от степени загрузки ресурса в используемом маршруте ее пересылки по сети. Эти результаты позволят менеджменту

телекоммуникационных компаний получить теоретическое обоснование проводимым мероприятиям, направленным на повышение качества работы мультисервисных сетей связи при совместном обслуживании разнородного трафика сервисов реального времени.

1.9. Выводы и постановка задачи исследования

Выполненный в данной главе анализ особенностей развития и планирования мультисервисных сетей связи показал, что при совместном обслуживании неоднородного трафика коммуникационных приложений реального времени наблюдается неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается применять либо резервирование, либо раздельное использование ресурса звеньев сети. Для обоснования процедуры выбора конкретного сценария необходима разработка моделей, реализующих эти сценарии, а также алгоритмов расчета их характеристик. Перечисленные проблемы планирования и эксплуатации мультисервисных сетей связи, а также анализ опубликованных работ приводят к следующим задачам исследования:

1. Разработать семейство моделей мультисервисных сетей связи, учитывающих условия обслуживания информационных потоков, порожденных современными коммуникационными приложениями. К ним относятся: зависимость требуемого ресурса и среднего времени обслуживания заявки от номера потока; зависимость вероятности допуска заявки к обслуживанию от наличия необходимого числа свободных единиц ресурса и от степени загрузки ресурса в используемом маршруте ее пересылки по сети.

2. Для построенного семейства моделей мультисервисных сетей связи разработать методы точной и приближенной оценки показателей качества

совместного обслуживания заявок на передачу неоднородного трафика реального времени, пригодные для использования в заданной области изменения входных параметров.

3. Показать возможности применения моделей и методов их расчета для решения практических задач, возникающих в процессе планирования и эксплуатации мультисервисных сетей, в частности, для оценки значения скорости передачи соединительных линий сети, обеспечивающего заданные показатели обслуживания поступающих потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени.

ГЛАВА 2

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

2.1. Введение

Для достижения цели исследования, сформулированной в конце предыдущей главы, необходимо построить математическую модель мультисервисной сети связи, в которой рассматривается процесс обслуживания трафика сервисов реального времени. При построении модели необходимо учесть возможность образования потока поступающих заявок от конечных групп пользователей услуг связи, а также возможность получения отказа в обслуживании из-за действия процедур контроля допуска заявки при наличии достаточного объема ресурса передачи информации во всех линиях маршрута следования трафика.

В разделе 2.2 исследуются особенности совместной передачи информационных потоков в мультисервисных сетях связи, введены понятия единицы канального ресурса, построены используемые модели формирования интервалов времени между поступлением заявок и промежутка времени их обслуживания. В этом же разделе приведено математическое описание анализируемой модели сети, даны определения характеристик качества обслуживания поступающих заявок и рассмотрены методы их оценки. В разделе 2.3 рассмотрены особенности моделирования в мультисервисных сетях процесса поступления заявок от конечных групп пользователей услуг связи, а также учета зависимости вероятности допуска заявок к обслуживанию от величины ресурса занятого во всех звеньях сети.

В разделе 2.4 рассмотрены особенности имитационного моделирования сетей связи и построена имитационная модель процедуры обслуживания

заявок на передачу трафика сервисов реального времени. В следующем разделе имитационное моделирование применяется для оценки зависимости доли потерянных заявок и коэффициента использования единицы ресурса передачи информации от наличия неоднородности в требованиях к ресурсу, необходимому для обслуживания поступающих заявок. В разделе 2.5 сформулированы выводы по главе.

2.2. Моделирование процессов поступления и обслуживания заявок в сетях связи

2.2.1. Единица канального ресурса

Конкретный вид модели, используемой для расчета мультисервисной сети, т.е. расположение узлов сети, количество и вид структурных параметров, участвующих в ее описании, скорость передачи линий связи, определяются типом характеристик качества обслуживания поступающих запросов, которые применяются при оценке достаточности скорости звеньев сети. Выбор характеристик определяет степень детальности, на которой будет вестись анализ совместного обслуживания информационных потоков. В дальнейшем будем исследовать процесс выделения ресурса передачи информации на шкале времени, соответствующей моментам поступления заявок. Такой подход позволяет выполнить расчет значений доли потерянных заявок и величины интенсивности обслуженной нагрузки с использованием алгоритмов и моделей, разработанных для вычисления характеристик многопоточковых моделей с коммутацией каналов. Для формального построения модели необходимо ввести важное для мультисервисных сетей понятие единицы канального ресурса [88].

Для определения этой характеристики модели потребуется дополнительно ввести понятие эффективной интенсивности информационного потока [93],

которое используется для оценки потребности в пропускной способности линии при пакетной передаче импульсного трафика коммуникационных приложений. Как уже было сказано величина эффективной интенсивности дает возможность численно оценить эффект статистического мультиплексирования пакетизированного трафика и рассчитать максимально возможное число соединений определенного типа трафика, при фиксированной доле потерь пакетов. Обозначим символами h и m , соответственно, значения пиковой и средней интенсивностей поступления пакетов для анализируемого соединения. Эти характеристики только частично описывают статистические свойства информационного потока, относящегося к рассматриваемому соединению. Ясно, что необходимая скорость передачи линии находится между значениями m и h .

В литературе по теории телетрафика анализируемый параметр назван эффективной интенсивностью информационного потока [93]. Имеется формальное определение этой характеристики. Обозначим через $X(0,t)$ — число пакетов, поступивших от источника в интервале времени $[0,t]$. Тогда эффективная интенсивность $\alpha(s,t)$ определяется равенством

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st} \log M [e^{sX(t)}], \quad (2.1)$$

где M — математическое ожидание, а s и t зависят от условий обслуживания информационного потока, в частности, скорости передачи линии, размеров буфера, характеристик и параметров других совместно передаваемых потоков. В явном виде эффективная интенсивность может быть рассчитана для источников, заданных математически [93]. В остальных случаях применяются оценки. Приведем одну из наиболее известных аппроксимаций. Пусть: m —

средняя, h — пиковая интенсивности поступления информации, C — скорость линии, P_{loss} — доля потерянных пакетов, а значения констант x, y определяются из выражений $x = -\frac{2h}{C} \log_{10} P_{loss}$, $y = 1 - \frac{1}{50} \log_{10} P_{loss}$. Тогда эффективная интенсивность источника α находится из следующего эмпирического соотношения [97]

$$\alpha = \begin{cases} ym(1 + 3x(1 - \frac{m}{h})), & \text{если } 3x \leq \min(3, \frac{h}{m}), \\ ym(1 + 3x^2(1 - \frac{m}{h})), & \text{если } 3 < 3x^2 \leq \frac{h}{m}, \\ h, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2.2)$$

В качестве примера приведём значения введенных характеристик при передаче речевого трафика [79]. В этом случае значения пиковой, средней и эффективной интенсивностей равны, соответственно, 64 кбит/с, 25 кбит/с и 30 кбит/с. Последний результат получен с помощью (2.2).

Введем понятие единицы канального ресурса, воспользовавшись следующим алгоритмом [88]. Рассмотрим сеть из J звеньев. Занумеруем их произвольным образом. Предположим, что звено сети с номером j имеет скорость передачи C_j бит в секунду, в сети обслуживаются n потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Для обслуживания заявки k -го потока требуется канальный ресурс D_k бит в секунду в каждом звене маршрута, по которому передается информационный поток, ассоциированный с предоставлением сервиса k -го типа. Будем предполагать, что требуемая скорость передачи D_k не меняется за время обслуживания и оценивается либо на основе пиковой интенсивности поступления пакетов, либо с

использованием понятия эффективной интенсивности поступления пакетов. Единицей канального ресурса c является наибольший общий делитель (НОД) целочисленных значений скоростей C_1, \dots, C_J всех звеньев сети и требований к скоростям передачи D_1, \dots, D_n , каждого из n анализируемых потоков заявок

$$c = \text{НОД}(C_1, \dots, C_J, D_1, \dots, D_n). \quad (2.3)$$

Целочисленное выражение скорости j -го звена имеет вид $v_j = \frac{C_j}{c}$, а целочисленное выражение требования к скорости передачи при обслуживании заявки k -го потока записывается в виде соотношения $b_k = \frac{D_k}{c}$. Выбор единицы канального ресурса зависит от типа анализируемых коммуникационных сервисов. Чем меньше значение c , тем точнее будет аппроксимация анализируемых скоростей звеньев сети. Однако в этой ситуации растет размерность случайного процесса используемого для описания динамики изменения состояний модели. Часто в качестве единицы канального ресурса выбирается скорость 64 кбит/с, обеспечивающая качественную передачу речевого трафика.

2.2.2. Модель поступления заявок

Исследование процесса использования ресурса передачи информации звеньев мультисервисной сети идет на уровне поступления заявок на передачу трафика сервисов реального времени. В большинстве теоретических работ, относящихся к анализу мультисервисных сетей, предполагается, что поступление заявок подобного рода подчиняется закону Пуассона. В этой ситуации также говорят, что поток поступающих заявок является пуассоновским. Данному утверждению имеется теоретическое обоснование. Из положений теории вероятностей известно [3,13,57], что при суммировании

большого числа независимых потоков заявок с интенсивностями, стремящимися к нулю, результирующий поток по свойствам будет приближаться к пуассоновскому потоку, если число потоков стремится к бесконечности, а их суммарная интенсивность к константе.

Будем предполагать, что для анализируемой мультисервисной сети связи выполняются предположения о возможности использования пуассоновской модели входного потока заявок с интенсивностью поступления заявок и потребностями в канальном ресурсе зависящими от номера потока. Ясно, что не все модели мультисервисных сетей удовлетворяют данному предположению. В этом случае для реконструкции моментов поступления заявок на передачу трафика сервисов реального времени используются обобщения пуассоновской модели, которые, с одной стороны, позволяют учесть отмеченную специфику совместной передачи информационных потоков в мультисервисных сетях, а с другой стороны, также сохраняют и легкость оценки показателей качества обслуживания, характерную для пуассоновской модели. К таким обобщениям относятся модель с конечным числом источников нагрузки (мультисервисная модель Энгсета). Она позволяет учесть неоднородный характер поступления потоков заявок и зависимость интенсивности потока от степени загрузки канального ресурса. Особенности моделирования входного потока заявок в этой ситуации рассмотрены в разделе 2.3.

2.2.3. Модель занятия канального ресурса

Продолжительность интервала времени занятия канального ресурса на передачу информации, относящейся к обслуживанию одной заявки, определяется статистическими свойствами источника информационной нагрузки и используемой дисциплиной распределения передаточных возможностей звеньев сети. Если поступление заявок на информационное

обслуживания подчиняется пуассоновскому закону и поступившая заявка в случае получения отказа в обслуживании теряется без возобновления, то вид функции распределения времени занятия передаточного ресурса не влияет на значения вероятностей стационарных состояний. Соответствующее свойство следует из мультипликативного представления вероятностей состояний модели [56,94,95]. Значения вероятностей в анализируемой ситуации зависят только от средней продолжительности промежутка времени удерживания ресурса на передачу информационного потока, ассоциированного с обслуживанием поступившей заявки.

2.2.4. Формализованное описание топологии сети

Последовательность выбора звеньев сети при установлении соединения зависит от расположения узлов и их взаимосвязи. Последняя определяет топологию сети, которая является одной из ее важнейших характеристик. В зависимости от специфики анализируемой сети связи могут использоваться самые разнообразные виды соединения узлов сети. К наиболее распространенным топологиям относятся: кольцевая, полносвязная, иерархическая, линейная и т.д. Каждая из указанных топологий имеет свои достоинства и недостатки, которыми руководствуются инженеры-проектировщики при выборе конкретного плана строительства сети связи [53,57]. Эффективность использования каждой из отмеченных топологий зависит от размеров сети связи. Для небольших сетей выбор должен быть сделан в пользу полносвязных схем соединения узлов, для больших — в пользу иерархических. Обычно полносвязные топологии используются при строительстве ядра сети. Достоинства полносвязной схемы: уменьшение времени соединения и числа звеньев сигнализации, упрощение администрирования сети. Положительными характеристиками иерархической схемы является простота организации взаимодействия с другими сетями и

относительная легкость реализации процедуры расширения сети. Обычно иерархические топологии применяются на уровне организации доступа в сеть связи. С точки зрения формального изложения структуры сети вид топологии не имеет значения.

Пересылка информационного потока по сети, связанного с обслуживанием поступившей заявки на передачу трафика реального времени, характеризуется маршрутом, который состоит из номеров линий сети, используемых для обслуживания заявки. Для каждого потока последовательность выбора звеньев сети фиксирована и не меняется. Если в анализируемой сети связи наличествует альтернативный маршрут движения трафика, то для учета этой особенности обслуживания поступающих заявок исходный поток в модели разбивается на два с помощью процедуры просеивания. Значение вероятности просеивания берется из данных статистических наблюдений. Оба потока поступающих заявок остаются пуассоновскими с соответствующим образом измененной интенсивностью поступления заявок. Один поток использует прямой маршрут, другой — альтернативный.

Будем предполагать, что при обслуживании заявки каждого конкретного потока используется одинаковое число единиц канального ресурса на всех звеньях сети, входящих в маршрут следования трафика. Обозначим через J число узлов сети, через n обозначим число потоков заявок, на передачу трафика сервисов реального времени, а через b_k обозначим число единиц канального ресурса, необходимых для обслуживания одной заявки k -го потока. Для формального представления маршрутов следования всех информационных потоков, связанных с обслуживанием поступающих заявок, вводится понятие маршрутной матрицы $R = \| r_{j,k} \|$ прямоугольного вида размера $J \times n$ с компонентами

$$R = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} & \cdots & r_{1,n-1} & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & r_{2,4} & \cdots & r_{2,n-1} & r_{2,n} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & r_{3,4} & \cdots & r_{3,n-1} & r_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ r_{J,1} & r_{J,2} & r_{J,3} & r_{J,4} & \cdots & r_{J,n-1} & r_{J,n} \end{pmatrix}.$$

Элемент матрицы $r_{j,k}$ указывает на использование j -го звена сети для пересылки информационного потока, относящегося к обслуживанию заявки k -го потока. Искомое утверждение следует из равенства

$$r_{j,k} = \begin{cases} b_k, & \text{заявка } k \text{ - го потока использует для} \\ & \text{своего обслуживания } j \text{ - ое звено} \\ & \text{сети, занимая } b_k \text{ единиц канального} \\ & \text{ресурса} \\ 0, & \text{заявка } k \text{ - го потока не использует} \\ & j \text{ - ое звено сети.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Анализируя вид каждой строки матрицы R , можно выяснить заявки каких потоков используют конкретное звено сети для передачи трафика, связанного с их обслуживанием и сколько при этом единиц ресурса линии им требуется, а каждый столбец матрицы указывает перечень линий, занимаемых при обслуживании конкретного потока заявок.

В качестве примера на рисунке 2.1 приведена схема сети из 7 узлов, 6 соединительных линий.

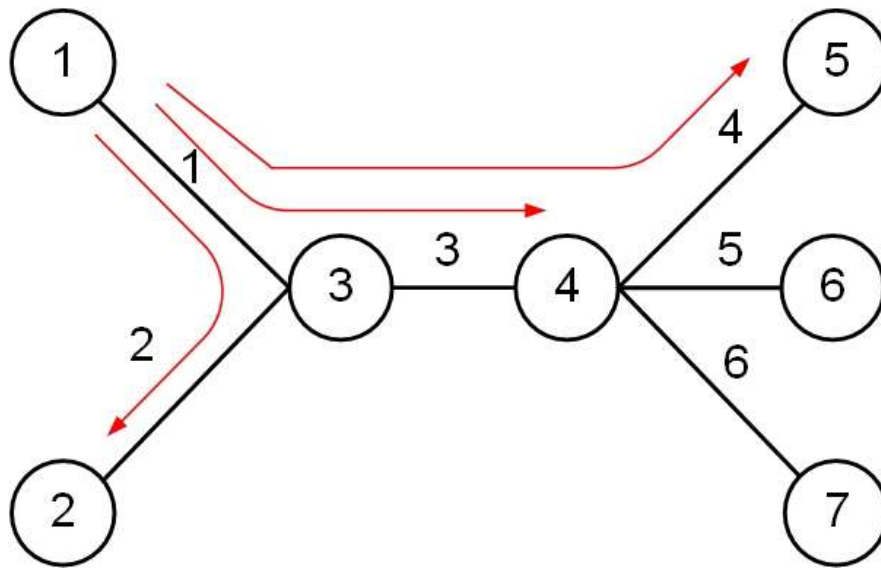


Рис. 2.1. Пример топологии сети из 7 узлов, 6 соединительных линий. Отмечены потоки трафика, связанные с обслуживанием заявок, использующих в качестве доступа 1-ый узел сети

По сети ведется пересылка информации для 8 потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Маршруты следования потоков определяются следующим перечнем узлов: 1-ый — {1,3,2}, 2-ой — {1,3,4}, 3-ий — {1,3,4,5}, 4-ый — {3,4,6}, 5-ый — {2,3,4,6}, 6-ой — {2,3,4,7}, 7-ой — {5,4,6}, 8-ой — {5,4,7}. Отметим последовательность занимаемых звеньев сети каждым потоком заявок: 1-ый — {1,2}, 2-ой — {1,3}, 3-ий — {1,3,4}, 4-ый — {3,5}, 5-ый — {2,3,5}, 6-ой — {2,3,6}, 7-ой — {4,5}, 8-ой — {4,6}. На рисунке отмечены три потока трафика, связанные с обслуживанием заявок, использующих в качестве доступа 1-ый узел сети. Для того, чтобы заявка определенного, например, k -го, потока была принята к обслуживанию, необходимо, чтобы на всех линиях, составляющих маршрут следования информации данного потока было свободными не менее b_k единиц канального ресурса. Маршрутная матрица R , соответствующая выбранной

топологии сети и маршрутам следования информационных потоков имеет вид

$$R = \begin{vmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_6 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 & b_7 & b_8 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 & b_5 & 0 & b_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_6 & 0 & b_8 \end{vmatrix}.$$

2.2.5. Математическое описание модели

Используя стандартные подходы развитые в теории телетрафика [53,57,109], приведем математическое описание исследуемой модели мультисервисной сети, анализируемой на шкале времени поступления заявок на установление соединения с целью передачи трафика сервиса реального времени. Как уже было отмечено в сети имеется некоторое число узлов, связанных между собой соединительными линиями. Занумеруем имеющиеся звенья сети цифрами от 1 до J . Обозначим через R_k множество номеров соединительных линий сети, используемых при обслуживании заявки k -го потока, а через N_j обозначим множество номеров потоков заявок, при обслуживании которых используется j -ая линия сети. Будем называть k -ым маршрутом множество номеров соединительных линий, используемых при передаче трафика, ассоциированного с обслуживанием заявки k -го потока. Обозначим через v_j скорость передачи j -ой линии $j = 1, \dots, J$, выраженную в единицах канального ресурса, требуемого для обслуживания поступающих информационных потоков. Предполагается, что в сети передаются n потоков трафика, порожденных разнообразными коммуникационными приложениями, относящимися к передаче трафика сервисов реального времени: речевые сообщения, данные, видео и т.д.

Занумеруем поступающие потоки цифрами от 1 до n . Обозначим через λ_k интенсивность поступления заявок k -го потока. Заявки k -го потока поступают через случайные промежутки времени, имеющие экспоненциальное распределение с параметром λ_k , следовательно поступление заявок k -го потока подчиняется пуассоновскому закону [53,57,109]. Будем также предполагать, что время обслуживания заявки для каждого из потоков имеет экспоненциальное распределение с параметром α_k . Как уже было сказано данное предположение является избыточным и используется для упрощения записи промежуточных математических выражений. Полученные далее результаты справедливы для любых распределений длительности интервала времени обслуживания заявки, если соответствующие интервалы не зависят друг от друга и от поступающих потоков заявок.

Дальнейшие этапы построения математической модели сети связаны с построением случайного марковского процесса, описывающего динамику изменения числа заявок разных потоков, находящихся в сети на обслуживании. Выбор состояния связан с типом рассчитываемых далее характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Для оценки эффективности совместного обслуживания заявок и определения требуемой скорости звеньев сети необходимо знать долю потерянных заявок каждого потока и среднюю величину ресурса линий, занятых на их обслуживание. Для вычисления этих характеристик достаточно знать долю времени пребывания модели сети в состоянии с фиксированным числом заявок каждого потока, находящихся одновременно на обслуживании. Известно [3,14,57], что вероятности стационарных (предельных) состояний марковского процесса имеют интерпретацию доли времени пребывания процесса в соответствующем состоянии и могут быть найдены из решения системы уравнений статистического равновесия, которое в ряде случаев имеет

мультипликативную форму. Воспользуемся этим результатом для определения требуемых показателей качества совместного обслуживания заявок и построения алгоритма оценки их численных значений.

Из проведенного обсуждения следует, что при выборе состояния достаточно зафиксировать число заявок каждого вида, находящихся на обслуживании. Для определения случайного процесса необходимо ввести пространство состояний, множество элементов которого и будет множеством значений, принимаемых процессом. Обозначим через i_k число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании. Общее число заявок, находящихся на обслуживании, задаётся вектором (i_1, i_2, \dots, i_n) , на компоненты которого необходимо наложить ограничения, связанные с ограниченностью числа канальных единиц, имеющихся на соединительных линиях сети. Необходимо, чтобы канальный ресурс каждой линии, занятый в состоянии (i_1, i_2, \dots, i_n) на обслуживание заявок всех потоков, имеющих доступ к данной линии, не превосходил её скорости, выраженной в канальных единицах. Из данного утверждения вытекает система неравенств следующего вида:

$$\sum_{k \in N_1} i_k b_k \leq v_1, \tag{2.5}$$

$$\sum_{k \in N_2} i_k b_k \leq v_2,$$

.....

$$\sum_{k \in N_j} i_k b_k \leq v_j,$$

.....

$$\sum_{k \in N_J} i_k b_k \leq v_J.$$

Обозначим множество состояний (i_1, i_2, \dots, i_n) , удовлетворяющих приведенным выше соотношениям, через S .

2.2.6. Определение характеристик обслуживания заявок

Пространство состояний модели S состоит из конечного числа элементов. Если известны значения доли времени пребывания модели в каждом из состояний $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$, то используя стандартные определения, можно рассчитать значения стационарных характеристик качества обслуживания поступающих заявок, которые применяются при оценке достаточности канального ресурса и анализе эффективности его занятия при совместной передаче трафика сервисов реального времени. Для нахождения значений доли времени пребывания модели в состоянии $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ достаточно построить марковский процесс, принимающий значения в пространстве состояний S , и рассчитать значения его стационарных вероятностей $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$.

Приведем формальные определения компонент случайного процесса, задающего характер изменения состояний исследуемой модели сети во времени. Пусть $i_k(t)$ — число заявок k -го потока, находящихся в момент времени t на обслуживании $k = 1, 2, \dots, n$. Переход модели сети из одного состояния в другое описывается многомерным марковским процессом

$$r(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)),$$

где t — параметр времени, а $r(t)$ — случайная функция, принимающая значения из множества состояний S .

Покажем наличие марковских свойств у процесса $r(t)$. Действительно, при построении модели использовались предположения об экспоненциальном

характере распределения длительности интервала времени между последовательными поступлениями заявок и продолжительности промежутка времени его удерживания на передачу трафика сервисов реального времени. Эти случайные величины не зависят друг от друга. Приведенные предположения позволяют утверждать, что $r(t)$ построен в соответствии с положениями конструктивного определения марковского процесса [13,57,93]. Отсюда и следуют марковские свойства $r(t)$. Это обстоятельство существенно упрощает оценку характеристик качества обслуживания поступающих заявок.

Стационарная вероятность $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$ задает долю времени пребывания сети в состоянии с известным числом заявок каждого потока, находящихся на обслуживании. Эти вероятности могут использоваться для вычисления характеристик обслуживания информационных потоков.

Разрабатываемая модель в первую очередь предназначена для решения задач планирования сети. В формулировке задачи используются показатели приёма новых заявок к обслуживанию. Важнейшим из них является доля потерянных заявок. Дадим характеристикам формальные определения, используя значения $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$. Исходя из свойств марковского процесса, значение π_k доли заявок k -го потока, получивших отказ в обслуживании, равно величине доли времени пребывания модели сети в состояниях, когда поступившая извне заявка получает отказ на уровне доступа из-за недостаточности свободного канального ресурса хотя бы в одной из линий, входящих в состав k -го маршрута. Справедливость сформулированного утверждения вытекает из свойств стационарных вероятностей марковского процесса. Обозначим множество состояний, удовлетворяющих перечисленным характеристикам через B_k . Формальное определение множества B_k с помощью компонент состояний (i_1, i_2, \dots, i_n) процесса $r(t)$ имеет вид:

$$B_k = \{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S | (i_1, \dots, i_{k-1}, i_k + 1, i_{k+1}, \dots, i_n) \notin S\}. \quad (2.6)$$

Используя введенные характеристики, нетрудно записать выражение для оценки π_k

$$\pi_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in B_k} p(i_1, i_2, \dots, i_n). \quad (2.7)$$

Обозначим через m_k среднее число единиц канального ресурса, используемых для обслуживания заявок k -го потока. Значение m_k оценивается из формулы:

$$m_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} p(i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k. \quad (2.8)$$

Если значение m_k известно, то нетрудно рассчитать величину Y_k среднего числа заявок k -го потока, находящихся на обслуживании, $Y_k = \frac{m_k}{b_k}$.

2.2.7. Оценка характеристик обслуживания заявок

Обозначим через $a_k = \frac{\lambda_k}{\alpha_k}$ интенсивность поступления заявок k -го потока, выраженную в эрлангах, т.е. в среднем числе поступлений заявок за среднее время их обслуживания $\frac{1}{\alpha_k}$. Фундаментальной характеристикой модели является наличие свойства мультипликативности [53,57,90,93,110] у значений вероятностей $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$. Оно позволяет записать следующие расчетные выражения для оценки $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$:

$$p(i_1, i_2, \dots, i_n) = \frac{1}{N} \frac{a_1^{i_1}}{i_1!} \frac{a_2^{i_2}}{i_2!} \dots \frac{a_n^{i_n}}{i_n!}, \quad (i_1, i_2, \dots, i_n) \in S, \quad (2.9)$$

где

$$N = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} \frac{a_1^{i_1}}{i_1!} \frac{a_2^{i_2}}{i_2!} \dots \frac{a_n^{i_n}}{i_n!}.$$

Для небольших по структуре моделей мультисервисных сетей мультипликативное соотношение (2.9) позволяет рассчитать значения стационарных вероятностей через значения входных параметров поступающих потоков заявок, а с ними и величины введенных характеристик обслуживания поступающих заявок. Примером такого решения служит формула Эрланга. Для более сложных случаев можно построить рекурсивные алгоритмы точной оценки значений характеристик, основанные на интеграции микросостояний числа заявок, находящихся на обслуживании, в макросостояния общего числа занятых канальных единиц. Примером подобного решения является рекурсивный алгоритм Кауфмана-Робертса [110].

В общем случае для оценки введенных характеристик π_k и m_k , $k = 1, 2, \dots, n$, используются средства имитационного моделирования. Увеличивая число испытаний, например, число поступивших заявок, можно теоретически найти значения характеристик с любой заданной наперед точностью. Особенности реализации имитационных программ будут рассмотрены в разделе 2.4. Для решения инженерных задач, связанных с оценкой необходимого ресурса передачи информации звеньев мультисервисных сетей связи используются приближенные методы. Наиболее эффективным с точки зрения практических приложений является метод просеивания заявок. Он будет рассмотрен в разделе 3.3.

2.3. Моделирование реальных особенностей поступления и обслуживания заявок в системах связи

2.3.1. Конечное число источников заявок

В реальных системах связи может сложиться ситуация, когда предположение о пуассоновском характере поступления заявок может не выполняться. Так происходит при наличии в сети пользователей инфокоммуникационных услуг, которые имеют существенные требования к ресурсу передачи информации. Обычно это заказ сервисов, основанных на передаче видеотрафика. Поскольку абоненты требуют существенную долю канального ресурса линии, то изменение количества активных абонентов меняет интенсивность потока предложенного трафика. Для учета этого явления используются вероятностная модель формирования входного потока заявок, носящая название модель Энгсета. В моделях подобного рода абонент, формирующий k -ый поток заявок, может находиться в состоянии посылки вызова через экспоненциально распределенный промежуток времени или в состоянии ее обслуживания. В последнем случае заявки от абонента не поступают.

Помимо пользователей услуг связи, требующих существенной доли передаточных возможностей звеньев сети, составляющих маршрут движения трафика, в сети могут присутствовать абоненты требующие установления соединения для передачи обычного речевого трафика. Поскольку требования к ресурсу передачи невелики, а число подобных пользователей достаточно большое то можно считать выполненными предположения о пуассоновском характере поступления заявок анализируемого потока. Таким образом, в сети рассматриваются процессы поступления и обслуживания n потоков заявок на установление соединения с целью передачи трафика сервисов реального времени. Из анализируемых n потоков n_1 формируются группами, состоящими

из конечного числа пользователей, а n_2 — группами, состоящими из бесконечного числа пользователей (использование здесь и далее термина *бесконечный* означает, что число абонентов велико и существенно не сказывается на интенсивности поступающего потока заявок). Обозначим через ω_1 множество номеров потоков заявок, формируемых группами из конечного числа пользователей услуг связи, а через ω_2 обозначим множество номеров потоков заявок, формируемых группами из бесконечного числа пользователей.

Обозначим через S_k число пользователей услуг связи, формирующих k -ую группу, $k \in \omega_1$. Абонент сети, входящий в состав k -ой группы, $k \in \omega_1$, посылает заявку на передачу ресурсоемкого трафика реального времени через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным β_k . Для передачи трафика требуется b_k канальных единиц в всех звеньях сети, составляющих маршрут движения трафика, ассоциированного с обслуживанием заявки анализируемого потока. Далее возможны два варианта развития событий. Если в используемом маршруте движения трафика имеется необходимое число свободных канальных единиц, то все они занимают на случайное время обслуживания заявки k -го потока, имеющее экспоненциальное распределение с параметром равным α_k . Если требуемого числа свободных канальных единиц не хватает, то абонент, входящий в состав k -ой группы пользователей услуг связи, получает отказ и через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным β_k , от него поступает следующая заявка и сформулированные выше действия, связанные с формированием k -го потока заявок, повторяются.

Заявки на предоставление ресурса передачи информации, сформулированные бесконечной группой пользователей услуг связи и

принадлежащие k -му потоку $k \in \omega_2$, поступают в соответствии с пуассоновским распределением и имеют интенсивность λ_k . Для обслуживания поступившей заявки требуется b_k канальных единиц во всех звеньях сети, составляющих маршрут движения трафика, ассоциированного с обслуживанием заявки анализируемого потока. Время обслуживания заявки k -го потока, имеет экспоненциальное распределение с параметром равным α_k . Если требуемого числа свободных канальных единиц не хватает, то поступившая заявка получает отказ и не возобновляется.

В качестве примера анализируемой процедуры формирования потоков поступающих заявок на рисунке 2.2 приведена схема сети из 7 узлов и 6 соединительных линий, рассмотренная ранее на рисунке 2.1.

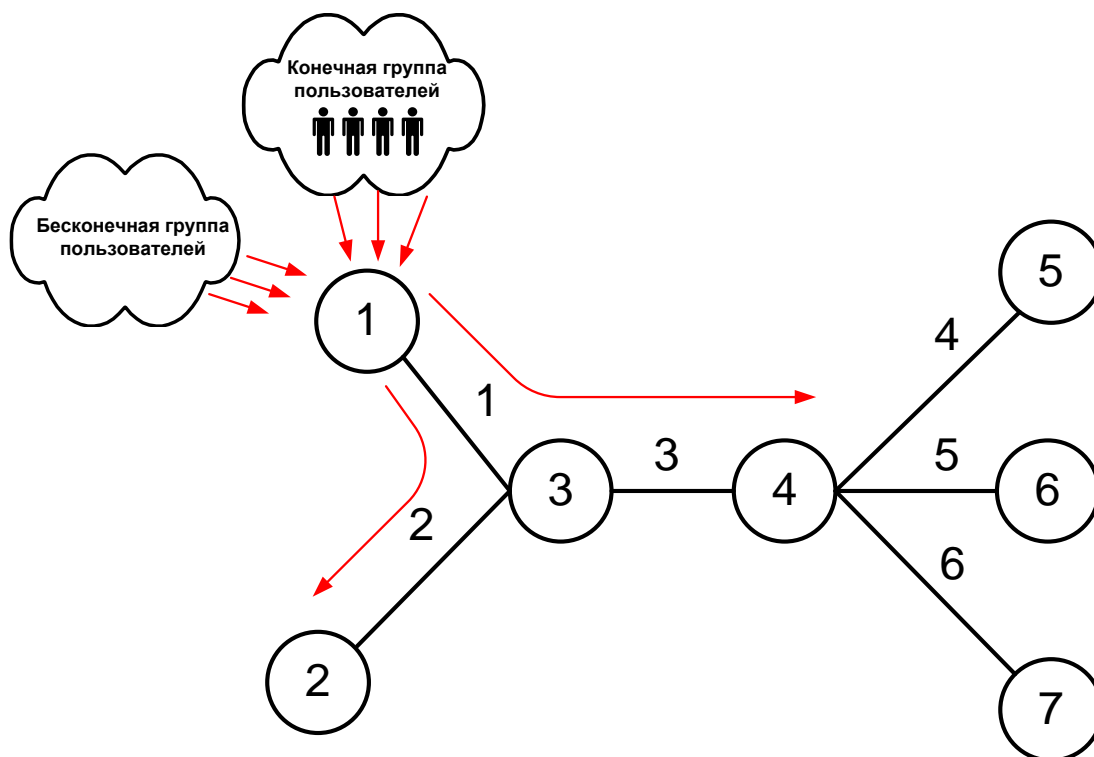


Рис. 2.2. Пример сети из 7 узлов и 6 соединительных линий. Отмечены потоки трафика, формируемые конечным и бесконечным числом пользователей

По сети ведется пересылка информации двух потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Первый поток образован бесконечным числом пользователей. Для передачи трафика используются звенья сети с номерами $\{1,2\}$. Второй поток образован конечным числом пользователей. Для обслуживания заявки требуется существенный ресурс линий сети, входящих в маршрут следования соответствующей нагрузки. Для передачи трафика используются звенья сети с номерами $\{1,3\}$.

Для удобства последующих преобразований примем, что для всех потоков параметр экспоненциального времени обслуживания заявок равен единице. Таким образом, для всех потоков интенсивность поступления заявок будет выражена в среднем числе заявок, поступающих за среднее время их обслуживания. По определению это означает, что величина интенсивности выражена в эрлангах, т.е. в среднем числе потенциальных соединений на предоставление заказанного сервиса. Обозначим соответствующую характеристику через a_k . Также обозначим через γ_k параметр экспоненциального распределения длительности интервала времени между последовательными поступлениями заявок от одного абонента из k -ой группы. Значения величин s_k , a_k , γ_k связаны между собой. Если известны значения a_k интенсивности предложенной нагрузки и s_k числа абонентов, формирующих k -ый поток, то можно найти величину γ_k . Для решения этой задачи используется соотношение [57]

$$\gamma_k = \frac{a_k}{s_k - a_k}.$$

Для k -го потока заявок, образованного конечной группой пользователей, интервал времени между последовательными поступлениями заявок в систему имеет экспоненциальное распределение с параметром $(s_k - i_k)\gamma_k$, где i_k —

число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании, $k \in \omega_1$.

2.3.2. Конечное число источников заявок: определение и оценка характеристик

Определение характеристик совместного обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени в случае пуассоновской модели поступления заявок следует описанию, приведенному в разделе 2.2.6. Процесс обслуживания заявок, поступающих от конечных групп пользователей, определяется уже большим числом характеристик. Приведем их определения. Процедуру занятия ресурса передачи информации будем характеризовать долей потерянных заявок, долей времени занятости доступного ресурса и средним числом канальных единиц, занятых на обслуживании поступающих заявок. Отметим, что в случае пуассоновской модели входного потока первые две характеристики совпадают между собой. Все введенные характеристики можно определить, если известны значения доли времени пребывания модели в состоянии с фиксированным числом заявок каждого типа, находящихся на обслуживании.

Структура случайного марковского процесса, который используется для описания обслуживания заявок аналогична той, что была использована для описания моделей с бесконечным числом пользователей (см. раздел 2.2). Приведем его компоненты. Функционирование модели во времени описывается многомерным марковским процессом

$$r(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)),$$

где $i_k(t)$ — число заявок k -го потока, находящихся в момент времени t на обслуживании, $k = 1, 2, \dots, n$. Обозначим через $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$ стационарную вероятность нахождения на обслуживании i_k заявок k -го потока, $k = 1, 2, \dots, n$.

Предположим, что значения $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$ известны. Обозначим через B_k множество состояний модели, в каждом из которых поступившая заявка k -го потока получает отказ из-за недостаточности канального ресурса хотя бы в одном из звеньев маршрута, используемого для передачи трафика сервиса реального времени, ассоциированного с обслуживанием заявки k -го потока. Определение множества B_k сформулировано в виде соотношения (2.6). Обозначим долю потерянных заявок символом $\pi_{c,k}$, долю времени занятости доступного ресурса обозначим символом $\pi_{t,k}$, а среднее число канальных единиц, занятых на обслуживание поступающих заявок, обозначим символом m_k . Введенные показатели определяются из следующих соотношений ($k \in \omega_1$):

$$\begin{aligned} \pi_{t,k} &= \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in B_k} p(i_1, i_2, \dots, i_n); \\ \pi_{c,k} &= \frac{\sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in B_k} p(i_1, i_2, \dots, i_n)(s_k - i_k)\gamma_k}{\sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} p(i_1, i_2, \dots, i_n)(s_k - i_k)\gamma_k}; \\ m_k &= \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} p(i_1, i_2, \dots, i_n)i_k b_k. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Фундаментальной характеристикой модели является наличие свойства мультипликативности у значений стационарных вероятностей $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$. Для удобства записи последующих формул будем предполагать, что потоки с номерами от 1 до n_1 поступают от конечных групп пользователей, а потоки с номерами от $n_1 + 1$ до n от бесконечных групп пользователей. Свойство мультипликативности позволяет записать следующие расчетные выражения для оценки значений $p(i_1, i_2, \dots, i_n)$:

$$P(i_1, i_2, \dots, i_n) = \frac{1}{N} \frac{\prod_{j=0}^{i_1-1} (s_1 - j) \gamma_1}{i_1!} \dots \frac{\prod_{j=0}^{i_{n_1}-1} (s_{n_1} - j) \gamma_{n_1}}{i_{n_1}!} \times \quad (2.11)$$

$$\times \frac{a_{n_1+1}^{i_{n_1+1}} a_{n_1+2}^{i_{n_1+2}}}{i_{n_1+1}! i_{n_1+2}!} \dots \frac{a_n^{i_n}}{i_n!}, \quad (i_1, i_2, \dots, i_n) \in S,$$

где

$$N = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} \frac{\prod_{j=0}^{i_1-1} (s_1 - j) \gamma_1}{i_1!} \dots \frac{\prod_{j=0}^{i_{n_1}-1} (s_{n_1} - j) \gamma_{n_1}}{i_{n_1}!} \times \frac{a_{n_1+1}^{i_{n_1+1}} a_{n_1+2}^{i_{n_1+2}}}{i_{n_1+1}! i_{n_1+2}!} \dots \frac{a_n^{i_n}}{i_n!}.$$

Для сравнительно небольших по структуре моделей мультисервисных сетей приведенное мультипликативное соотношение позволяет рассчитать значения стационарных вероятностей через значения входных параметров поступающих потоков заявок, а с ними и величины введенных характеристик обслуживания поступающих заявок. Примером такого решения служит формула Энгсета. Для более сложных случаев можно построить рекурсивные алгоритмы точной оценки значений характеристик, основанные на интеграции микросостояний числа заявок находящихся на обслуживании в макросостояния общего числа занятых канальных единиц. Примером подобного решения является рекурсивный алгоритм расчета звена мультисервисной сети при расчете трафика типа ВРР [53,57,90,110]. В общем случае для оценки введенных характеристик $\pi_{t,k}$, $\pi_{c,k}$ и m_k , $k = 1, 2, \dots, n_1$ и π_k и m_k , $k = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n$ используются средства имитационного моделирования. Особенности реализации имитационных программ будут рассмотрены в разделе 2.4. Для решения инженерных задач, связанных с

оценкой необходимого ресурса передачи информации звеньев мультисервисных сетей связи используются приближенные методы.

2.3.3 Наличие внутренних блокировок

Одним из самых простейших способов контроля за распределением ресурса передачи информации является резервирование. С общих позиций действие процедуры резервирования удобно формализовать с использованием понятия функции внутренней блокировки [53,57]. Рассмотрим модель мультисервисной сети передачи трафика реального времени, введенную в разделе 2.2, и внесем в нее изменения, относящиеся к использованию функции внутренней блокировки $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$, определенной для каждого теоретически возможного состояния (i_1, i_2, \dots, i_n) модели сети. Здесь i_k — число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании. Обозначим множество подобных состояний через Ω . Состояние $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in \Omega$, если оно удовлетворяет системе соотношений (2.5). Реальное пространство состояний S , на котором определен случайный процесс $r(t)$, описывающий динамику изменения состояний модели сети, является подмножеством Ω и определяется выбором функции внутренней блокировки $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$. Значение $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ для каждого теоретически возможного состояния из множества Ω определяет вероятность допуска заявок k -го потока к каналному ресурсу звеньев сети, используемых для установления соединения для передачи трафика реального времени, ассоциированного с обслуживанием заявки k -го потока.

Функция $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ зависит от компонент состояния (i_1, i_2, \dots, i_n) . Если оказывается так, что в рассматриваемом состоянии (i_1, i_2, \dots, i_n) хотя бы в одном из звеньев, составляющих маршрут следования трафика, относящегося к

обслуживанию заявки k -го потока, нет b_k свободных единиц канального ресурса, то поступившая заявка получает отказ с вероятностью, равной единице. Таким образом, для анализируемого состояния $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n) = 1$. Если во всех звеньях используемого маршрута имеется достаточное число канальных единиц, то заявка k -го потока принимается к обслуживанию с вероятностью $1 - \varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$, а с дополнительной вероятностью $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)$ получает отказ. Длительность промежутка времени обслуживания заявки имеет экспоненциальное распределение с параметром α_k . Подбирая значение функции внутренней блокировки, можно анализировать различные формы резервирования канального ресурса. Напомним характеристики модели сети. Её топология определяется маршрутной матрицей R . Анализ матрицы дает возможность определить множества N_j номеров потоков заявок, использующих j -ую линию, $j = 1, 2, \dots, J$, и множества R_k номеров звеньев сети, составляющих маршрут движения трафика, относящегося к обслуживанию k -ой заявки, $k = 1, 2, \dots, n$. Обозначим через θ_k уровень резервирования канального ресурса при обслуживании заявок k -го потока. Данная схема резервирования означает следующее. Поступившая заявка k -го потока принимается на обслуживание, если в каждом из звеньев, составляющих маршрут движения трафика, ассоциированного с обслуживанием рассматриваемой заявки, имеется θ_k или менее занятых канальных единиц ресурса. Формально применение данной схемы резервирования означает следующий выбор величины функции внутренней блокировки: $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n) = 0$, если выполняются соотношения $\forall j \in R_k, \sum_{k \in N_j} b_k i_k \leq \theta_k$. Если же существует хотя бы одно $j \in R_k$, для которого

$\sum_{k \in N_j} b_k i_k > \theta_k$, то $\varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n) = 1$, т.е. поступившая заявка k -го потока получает

отказ несмотря на возможное наличие свободного канального ресурса достаточного для обслуживания поступившей заявки.

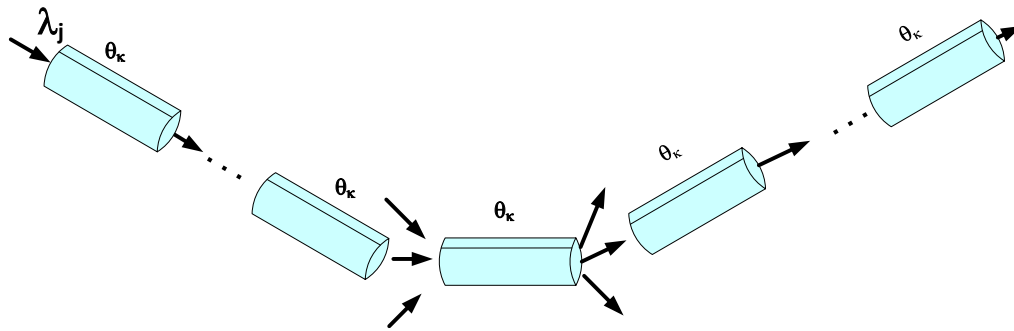


Рис. 2.3. Схема резервирования канального ресурса для заявок k -го потока

Ограничивая доступ к ресурсу передачи информации выбором значения θ_k , администрация сети не позволяет отдельным потокам заявок получить преимущество в его использовании, не предусмотренное принятым соглашением об обслуживании.

2.3.4 Внутренние блокировки: определение и оценка характеристик

Изменение состояний построенной модели мультисервисной сети с возможностью отказа в допуске заявок к обслуживанию при наличии достаточного объёма канального ресурса описывается марковским процессом

$$r(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)),$$

где $i_k(t)$ — число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании в момент времени t . Обозначим через $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ значение стационарной

вероятности пребывания модели в состоянии (i_1, i_2, \dots, i_n) . Приведем определения характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Рассмотрим вначале случай пуассоновского потока заявок, т.е. предполагается, что $k \in \omega_2$. Для решения задач планирования скорости передачи звеньев мультисервисной сети используются показатели приёма заявок к обслуживанию. Важнейшей характеристикой является доля π_k потерянных заявок k -го потока. Значение π_k определяется из соотношения

$$\pi_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) \varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n). \quad (2.12)$$

Значение среднего числа единиц канального ресурса m_k , занятых на обслуживание заявок k -го потока, находится из формулы

$$m_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k. \quad (2.13)$$

Рассмотрим теперь случай, когда поступающий поток заявок образован конечной группой пользователей услуг связи, т.е. предполагается, что $k \in \omega_1$. Обозначим долю потерянных заявок символом $\pi_{c,k}$. Значение m_k среднего числа канальных единиц, занятых на обслуживание поступающих заявок k -го потока определяется из соотношения (2.13). Для оценки $\pi_{c,k}$ воспользуемся следующим равенством:

$$\pi_{c,k} = \frac{\sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) (s_k - i_k) \gamma_k \varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)}{\sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) (s_k - i_k) \gamma_k}. \quad (2.14)$$

Расчёт введённых характеристик качества обслуживания поступающих заявок может быть выполнен с помощью численных методов после

составления и решения системы уравнений статистического равновесия. Приведём вид соответствующей системы. Значения $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ находятся в результате решения системы уравнений равновесия, которая имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
& P(i_1, i_2, \dots, i_n) \left(\sum_{k \in \omega_1} ((s_k - i_k) \gamma_k (1 - \varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)) + \right. \\
& \left. + i_k \alpha_k I(i_k > 0)) + \sum_{k \in \omega_2} (\lambda_k (1 - \varphi_k(i_1, i_2, \dots, i_n)) + i_k \alpha_k I(i_k > 0)) \right) = \\
& = \sum_{k \in \omega_1} P(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) (s_k - i_k + 1) \gamma_k \times \\
& \quad \times (1 - \varphi_k(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n)) I(i_k > 0) + \\
& \quad + \sum_{k \in \omega_2} P(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k \times \\
& \quad \times (1 - \varphi_k(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n)) I(i_k > 0) + \\
& \quad + \sum_{k=1}^n P(i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \alpha_k I((i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) \in S), \\
& \quad (i_1, i_2, \dots, i_n) \in S.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Полученные в результате решения системы уравнений равновесия ненормированные значения $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ необходимо нормировать, т.е. значения $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ должны удовлетворять условию нормировки

$$\sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) = 1.$$

Реализация стандартных численных алгоритмов решения системы уравнений статистического равновесия ограничена значениями структурных параметров модели и их можно применять в основном для однозвенных сетей.

Для вычисления значений характеристик качества передачи трафика сервисов реального времени для систем связи, состоящих из нескольких звеньев, можно использовать имитационное моделирование и приближённые методы. Основные моменты реализации алгоритма имитационного моделирования построенной модели сети будут рассмотрены в следующем разделе. Алгоритм приближённого расчёта значений введенных характеристик основан на реализации метода просеянного трафика и будет рассмотрен в разделе 3.3.

2.4. Имитационное моделирование процесса обслуживания трафика сервисов реального времени

2.4.1 Имитационная модель

Вычисление значений характеристик качества обслуживания заявок на передачу трафика реального времени в рамках построенной модели мультисервисной сети с учетом внутренних блокировок и размеров групп пользователей услуг связи возможен либо с помощью решения системы уравнений равновесия для сравнительно простых однозвенных моделей, либо с помощью реализации алгоритмов имитационного моделирования, если речь идет о численном анализе модели сети в общем случае. Обсудим основные этапы построения и реализации имитационной модели [53,57]. Главной положительной характеристикой имитационного моделирования является возможность его применения к широкому классу моделей систем связи при общих предположениях об особенностях построения интервалов времени между осуществлением событий. К недостаткам имитационного моделирования следует отнести существенное по значению время реализации процедуры счета. При использовании данного способа оценки значений характеристик необходимо контролировать точность полученных численных результатов. Для этого обычно используются процедуры математической

статистики. Как правило, при выполнении численного моделирования систем связи имитационные методы используются для проверки достоверности результатов, полученных с помощью приближенных процедур.

В исследуемой модели интервалы времени между поступлением заявок на передачу трафика сервисов реального времени и промежутки времени занятия ресурса сети на передачу трафика имеют экспоненциальное распределение с соответствующим параметром. Для моделирования длительностей этих интервалов используются датчики равномерно распределенных случайных величин, реализованные в большинстве стандартных алгоритмических языков моделирования, например, BASIC, C+ и т.д. Обозначим через U значение, псевдослучайной случайной величины, равномерно распределенной в интервале $(0,1]$ и получаемой с использованием подобного датчика. Зная последовательность значений U , нетрудно построить последовательность реализаций экспоненциально распределенной псевдослучайной величины H с параметром h . Значения соответствующей величины определяются с помощью

известного равенства $H = -\frac{\ln U}{h}$. Если в анализируемой модели используются

другие случайные величины, то применяются либо подобные равенства (или некоторые их комбинации), либо другие вычислительные процедуры в том числе и табличные.

Полученное численное значение характеристики качества обслуживания поступившей заявки с некоторой вероятностью находится в заданном интервале. Границы интервала зависят от числа проделанных экспериментов и от предполагаемой точности оценки характеристики. Для определения численных значений границ применяются методы математической статистики. Кратко сформулируем последовательность их реализации [53,57]. Общее число моделируемых событий, например, поступивших заявок, делят на группы одинакового размера. Для каждой из анализируемых групп находят среднее

значение оцениваемой характеристики. Обозначим рассчитываемую характеристику через π , число групп – через m , а среднее значение рассматриваемой характеристики, найденное в процессе анализа k -ой группы, – через π_k . Для оценки π используют сумму

$$\bar{\pi} = \sum_{k=1}^m \frac{\pi_k}{m}.$$

Дисперсию используемой оценки π получим из формулы

$$\sigma_{\pi}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (\pi_k - \bar{\pi})^2}{m(m-1)}.$$

Если общее число анализируемых групп событий m не так велико (25-30), то для вычисления значений границ доверительного интервала используется распределение Стьюдента $t_{\alpha/2}$. В этой ситуации с вероятностью $1-\alpha$ истинное значение π находится в интервале:

$$\bar{\pi} \pm t_{\alpha/2} \sigma_{\pi}. \quad (2.16)$$

Для $1-\alpha=95\%$ в соответствии с таблицами распределения Стьюдента значение $t_{\alpha/2}$ примерно равно 2 и будет использовано в последующих численных примерах.

2.4.2 Оценка характеристик модели сети

В анализируемой модели мультисервисной сети с учетом возможности внутренних блокировок и с учетом размеров групп пользователей услуг связи

реализуются два вида событий, меняющих состояние модели. Это поступление заявки на передачу трафика сервисов реального времени и освобождение канального ресурса сети в результате окончания обслуживания соответствующей заявки. Значение доли потерянных заявок для каждого потока может быть получено через отношение счетчиков соответствующих событий. Для вычисления значений счетчиков, в соответствии с положениями дискретно-событийного моделирования, вводится понятие условного времени модели, под которым понимается время, отсчитываемое от момента последнего реализованного в модели события. Чтобы ответить на вопрос принимается поступившая заявка на обслуживание или нет, надо знать насколько заняты все звенья сети. На этот вопрос можно ответить, если известно число заявок всех потоков, находящихся на обслуживании в момент поступления анализируемой заявки.

Таким образом, состоянием анализируемой модели сети является число заявок всех n потоков, находящихся на обслуживании. Зная компоненты состояния, можно оценить ресурс, занятый на всех звеньях сети, и ответить на вопрос будет принята поступившая заявка или нет. Когда обслуживание заявки завершается соответствующее количество единиц канального ресурса освобождается во всех звеньях маршрута, связанного с передачей трафика, выполненного в процессе обслуживания анализируемой заявки.

Для формализованного описания процесса приема поступившей заявки и освобождения занятого ресурса введём двумерный массив $F_s[k, i]$, $k = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, v_{max}$, где n — число поступающих потоков заявок, а v_{max} — максимальное значение канального ресурса, оцениваемое по всем звеньям сети,

$$v_{max} = \max(v_1, v_2, \dots, v_J).$$

Для фиксированного значения номера потока $k = 1, 2, \dots, n$ число ненулевых элементов массива $F_s[k, i]$ показывают общее число заявок k -го потока, находящихся на обслуживании (их максимальное количество равно v_{max}). При этом для каждой заявки k -го потока, находящейся на обслуживании, например i -ой, значение $F_s[k, i]$ показывает остаточное время до окончания обслуживания анализируемой заявки, отсчитываемое от момента последнего реализованного в модели события.

Обозначим через t_s значение минимальной длительности интервала времени время до окончания обслуживания одной из заявок, находящихся в системе. Номер потока и заявки определяются из сравнения ненулевых элементов массива $F_s[k, i]$. Через t_c обозначим длительность интервала времени времени до поступления следующей заявки. Номер потока и длительность интервала времени времени до поступления заявки определяются из результатов моделирования соответствующих экспоненциально распределённых случайных величин. Тип события (т.е. освобождение ресурса или поступление заявки, а также номер потока) и длительность интервала времени до его наступления определяются из реализации минимума значений t_s и t_c . Если тип события известен, то подсчитывается статистика, связанная с его осуществлением, проводятся необходимые изменения массива $F_s[k, i]$ и выполняется переход к следующему событию.

Расчетная процедура, реализующая приведённый выше алгоритм, может быть представлена на любом алгоритмическом языке, например, Basic, C+ и т.д. При выполнении последующих вычислений средствами имитационного моделирования выполнялось 20–30 серий испытаний. В зависимости от вида анализируемой модели сети в каждой серии исследовался результат

поступления от 100 до 500 тыс. заявок. Количество серий и число заявок в каждой из них подбирались опытным путем. Для этого можно использовать результаты аналитического расчета частных случаев модели. Длительность счета зависит от значений числа потоков и каналов. Для моделей сетей, состоящих примерно из 10 узлов, при числе каналов в интервале 20–100 это время составляет 10–20 минут на персональной ЭВМ средней производительности.

2.5. Примеры расчётов с использованием имитационной модели

Выполним имитационное моделирование процесса совместного обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени. нас будет интересовать зависимость характеристик от степени неоднородности поступающих заявок в требованиях к ресурсу передачи информации. Такая ситуация, например, может возникнуть, когда происходит совместное обслуживание заявок на передачу речевого трафика и трафика связанного с пересылкой разного рода видеосообщений. Для оценки характеристик качества совместного обслуживания заявок будет использоваться методология имитационного моделирования, изложенная в предыдущем разделе. Там же указаны число серий и количество испытаний, выполненных в каждой серии. Относительная погрешность оценки значений характеристик составляла в большинстве случаев 2 — 7 процентов.

В качестве примера была использована сеть из 7 узлов и 6 соединительных линий, показанная на рисунке 2.4. Топология сети аналогична топологии, рассмотренной на рисунке 2.1, только с измененной структурой входных потоков.

На рисунке отмечены все потоки трафика, использующие в качестве промежуточной соединительной линии третье звено сети. Для простоты будем предполагать, что для обслуживания заявок всех потоков кроме девятого

необходимо использование одной единицы канального ресурса (низкоскоростной трафик, например, относящийся к передаче речевых сообщений), а для обслуживания заявки девятого потока необходимо использование 30 единиц канального ресурса (высокоскоростной трафик, например, относящийся к передаче видеосообщений).

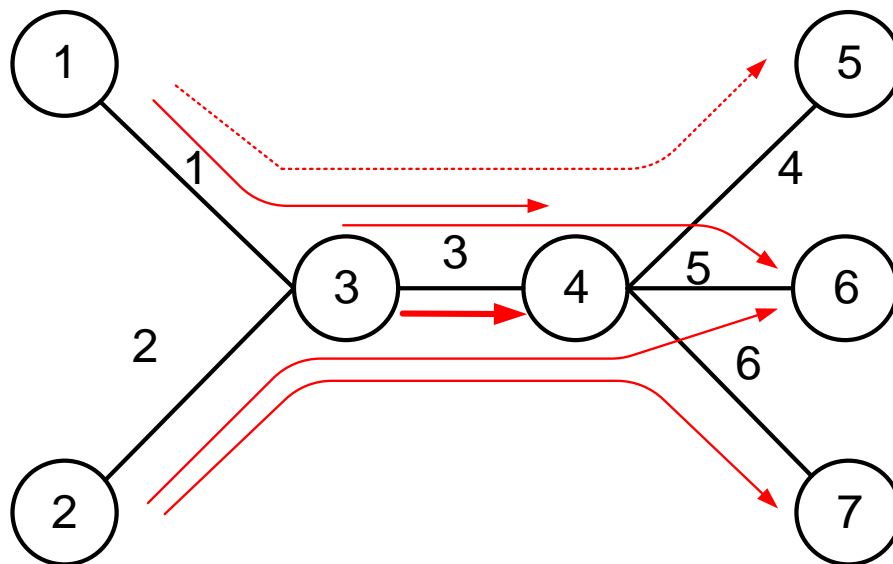


Рис. 2.4. Пример топологии сети из 7 узлов и 6 соединительных линий. Отмечены потоки трафика, связанные с обслуживанием заявок, использующих в качестве промежуточной соединительной линии 3-е звено сети

По сети ведется пересылка информации для 9 потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Маршруты следования потоков определяются следующим перечнем узлов: 1-ый — {1,3,2}, 2-ой — {1,3,4}, 3-ий — {1,3,4,5}, 4-ый — {3,4,6}, 5-ый — {2,3,4,6}, 6-ой — {2,3,4,7}, 7-ой — {5,4,6}, 8-ой — {5,4,7}, 9-ый — {3,4}. Отметим последовательность занимаемых звеньев сети каждым потоком заявок: 1-ый — {1,2}, 2-ой — {1,3}, 3-ий — {1,3,4}, 4-ый — {3,5}, 5-ый — {2,3,5}, 6-ой — {2,3,6}, 7-ой — {4,5}, 8-ой — {4,6}, 9-ый — {3}.

Для того, чтобы заявка определенного, например, k -го, потока была принята к обслуживанию, необходимо, чтобы на всех линиях, составляющих маршрут следования информации данного потока было свободно не менее b_k единиц канального ресурса. Маршрутная матрица R , соответствующая выбранной топологии сети и маршрутам следования информационных потоков, имеет вид

$$R = \begin{vmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & 0 & 0 & b_9 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 & b_7 & b_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 & b_5 & 0 & b_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_6 & 0 & b_8 & 0 \end{vmatrix}.$$

Напомним, что в приведенной матрице величины $b_k = 1$ к.е. для всех $k = 1, 2, \dots, 8$ и $b_k = 30$ к.е. для $k = 9$.

В ситуации, когда $b_k = 1$ к.е., предполагается, что потоки заявок на установление голосового соединения образованы большими, стремящимися к бесконечности группами абонентов, а поток заявок на установление видеосоединения образован конечной группой абонентов, которую будем считать состоящей из $s_9 = 30$ пользователей. Будем предполагать, что для всех потоков заявок длительность интервала времени обслуживания имеет экспоненциальное распределение с параметром равным единице. Отсюда следует, что среднее время обслуживания заявки принято за единицу. В этой ситуации интенсивности поступления заявок выражены в эрлангах, т.е. в среднем числе потенциальных соединений. Обозначим соответствующие интенсивности символом a_k , $k = 1, 2, \dots, 9$. Для модели с конечным числом пользователей длительность интервала времени между поступлением заявок от

одного абонента имеет экспоненциальное распределение с параметром γ_9 , определяемым из соотношения

$$a_9 = \frac{s_9 \cdot \gamma_9}{1 + \gamma_9}.$$

Отсюда следует, что величина γ_9 находится из формулы:

$$\gamma_9 = \frac{a_9}{s_9 - a_9}.$$

При проведении численного исследования будем считать переменными значения интенсивностей a_3 и a_9 , остальные значения $a_k = 5$ Эрл, $k = 1, 2, \dots, n$, $k \neq 3$ и $k \neq 9$. Маршрут следования низкоскоростного трафика, связанного с обслуживанием заявок третьего потока обозначен на рисунке пунктиром, а маршрут следования высокоскоростного трафика, связанного с обслуживанием заявок девятого потока обозначен на рисунке жирной линией. Значения a_3 и a_9 меняются от ситуаций создания малой, средней и большой загрузки 3-го звена сети. Приведем выражения для оценки d_k интенсивности предложенного трафика, проходящего через k -ое звено сети в соответствии с выбранной структурой маршрутной матрицы. Получаем такие формулы: $d_1 = a_1 + a_2 + a_3$; $d_2 = a_1 + a_5 + a_6$; $d_3 = a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_9$; $d_4 = a_3 + a_7 + a_8$; $d_5 = a_4 + a_5 + a_7$; $d_6 = a_6 + a_8$. Подставив фиксированные значения интенсивностей, получаем такие результаты: $d_1 = (10 + a_3)$ Эрл; $d_2 = 15$ Эрл; $d_3 = (20 + a_3 + a_9)$ Эрл; $d_4 = (a_3 + 10)$ Эрл; $d_5 = 15$ Эрл; $d_6 = 10$ Эрл.

Число канальных единиц в звеньях сети выберем в соответствии с заданными значениями интенсивностей a_k , $k = 1, 2, \dots, 9$. Искомые параметры

определяются из соотношений: $v_1 = 130$ к.е., $v_2 = 23$ к.е., $v_3 = 130$ к.е., $v_4 = 130$ к.е., $v_5 = 23$ к.е., $v_6 = 18$ к.е.

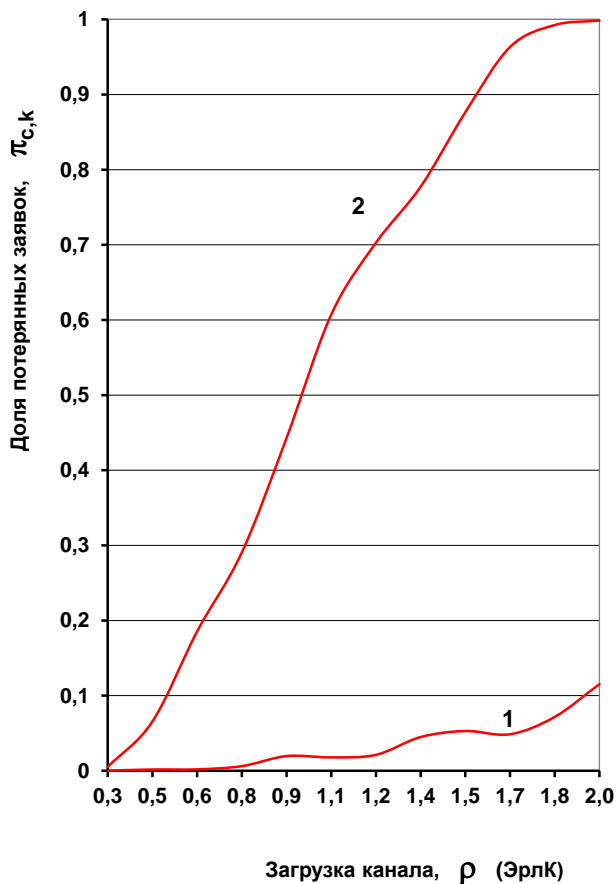


Рис. 2.5. Зависимость потерь заявок третьего и девятого потоков, выраженная в линейном масштабе, от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

На рисунке 2.5 для модели сети, ранее показанной на рисунке 2.4, приведены зависимости доли потерянных заявок для третьего и девятого потоков от изменения a_3 и $a_9 b_9$ от 0 до 120 ЭрлК. Значения потерь подсчитаны для 12 точек в соответствии с выражениями: $a_3[i] = 10 \times i$; $a_9[i] = a_3[i] / b_9$, $i = 1, 2, \dots, 12$. По оси абсцисс отложено значение

$\rho = \frac{a_2 + a_3[i] + a_4 + a_5 + a_6 + a_9[i] b_9}{v_3}, i = 1, 2, \dots, 12.$ Оно показывает величину

потенциальной загрузки единицы канального ресурса третьего звена анализируемой модели сети, выраженную в эрланго-каналах [53,57]. Цифрой 1 обозначена диаграмма для третьего потока (низкоскоростной трафик), а цифрой 2 — для девятого потока (высокоскоростной трафик).

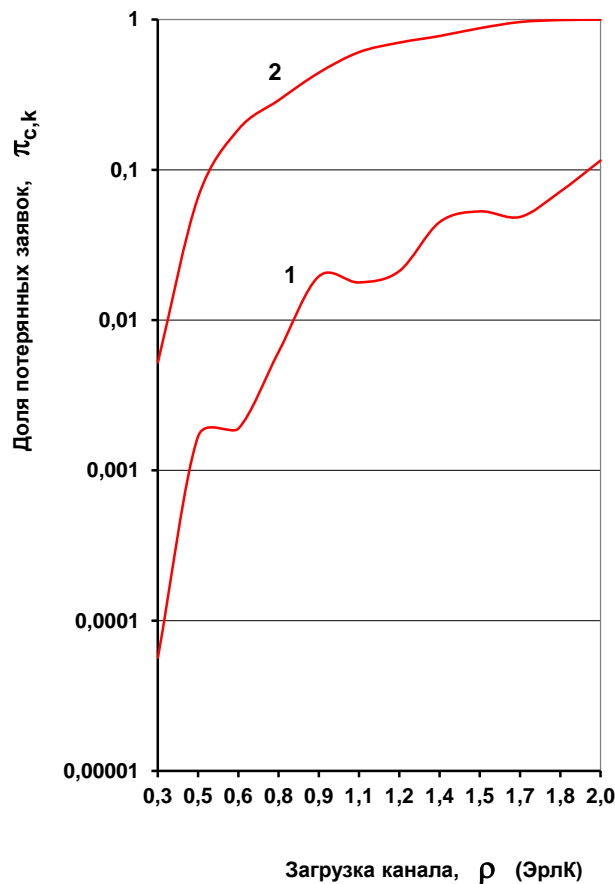


Рис. 2.6. Зависимость потерь заявок третьего и девятого потоков, выраженная в логарифмическом масштабе, от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

Из приведенных результатов следует, что несмотря на существенный рост потенциальной загрузки линии (отметим, что потенциальные величины

низкоскоростного и высокоскоростного трафика 3-го и 9-го потоков выраженные в эрланго-каналах, совпадают во всем диапазоне изменения поступающей нагрузки) для низкоскоростного трафика доля потерянных заявок увеличивается не столь быстро, как для высокоскоростного трафика.

Более того на отдельных участках изменения трафика доля потерянных заявок может и уменьшаться. Этот результат особенно заметен, если рассмотреть данную зависимость в логарифмическом масштабе. Она показана на рисунке 2.6. Данный факт объясняется следующим образом. Низкоскоростные заявки, занимая ресурс третьей линии, существенно сокращают доступ к обслуживанию высокоскоростных заявок, поскольку им для этого требуется одновременно резервировать существенный объем канального ресурса звена. Таким образом, несмотря на одинаковую потенциальную загрузку звена низкоскоростные заявки 3-го потока получают дополнительные возможности для использования канального ресурса сети, которые могли быть и не предусмотрены в принятом соглашении об обслуживании. Такое положение дел может привести к тому, что низкоскоростные заявки могут практически полностью сократить возможности попасть на обслуживание для высокоскоростных заявок.

Для иллюстрации этого положения на рисунке 2.7 показана зависимость среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание низкоскоростного трафика 3-го потока (кривая 1) и высокоскоростного трафика 9-го потока (кривая 2). Отметим, что на начальной стадии роста поступающей нагрузки оба потока занимают одинаковое среднее число канальных единиц.

Неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации относится ко всем потокам, которые делят общий канальный ресурс с потоком высокоскоростного трафика.

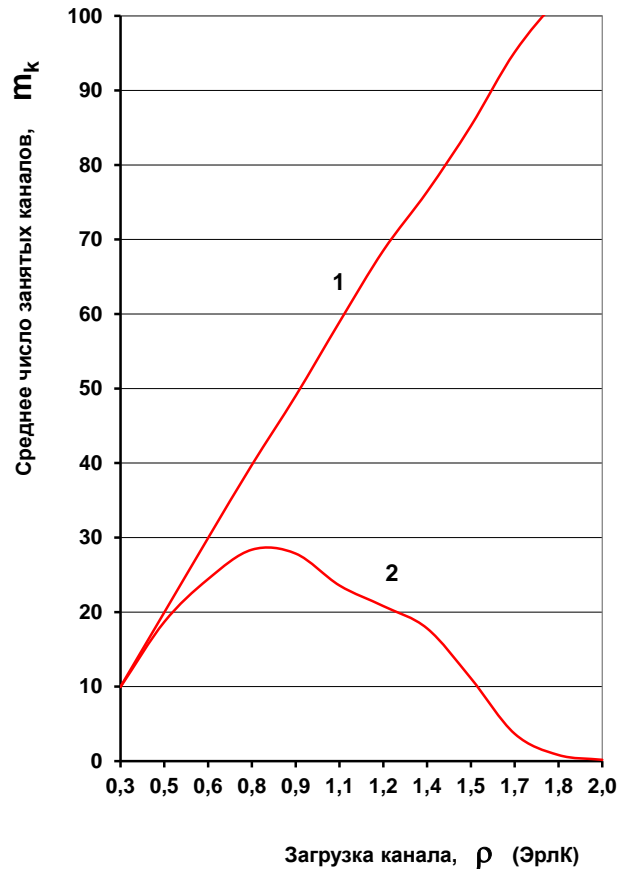


Рис. 2.7. Зависимость среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание низкоскоростного (кривая 1) и высокоскоростного (кривая 2) трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

Неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации относится ко всем потокам, которые делят общий канальный ресурс с потоком высокоскоростного трафика. Для иллюстрации этого положения на рисунке 2.8 приведены зависимости доли потерянных заявок для второго, пятого и шестого потоков от изменения a_3 и $a_9 b_9$ от 0 до 120 ЭрлК. Значения потерь подсчитаны для 12 точек в соответствии с формулами, использованными при расчете диаграмм, приведенных на рисунке 2.5.

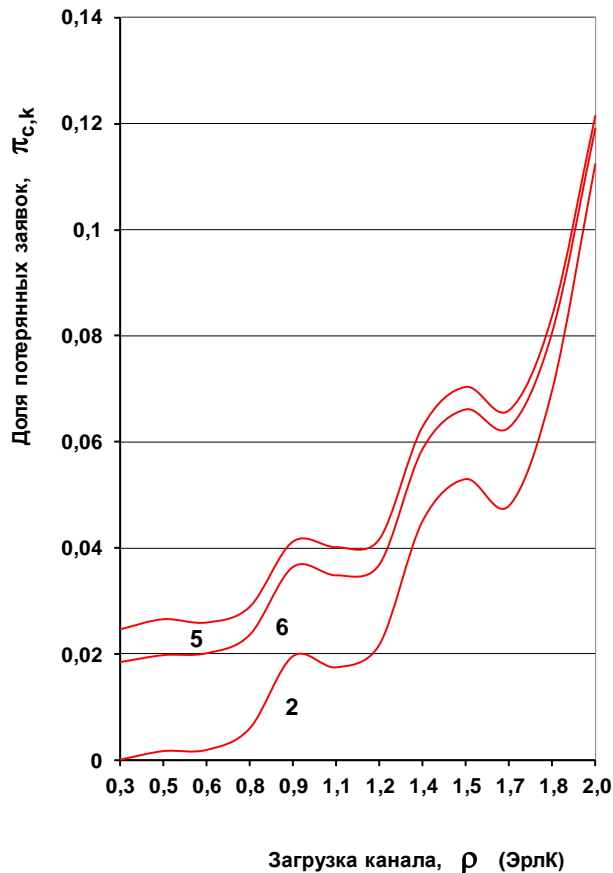


Рис. 2.8. Зависимость потерь заявок второго, пятого и шестого потоков, выраженная в линейном масштабе, от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

Отмеченное свойство неконтролируемого перераспределения ресурса передачи информации в пользу низкоскоростного трафика выполняется и для других моделей образования входных потоков заявок и функций распределения времени их обслуживания. В частности, оно было получено для пуассоновской модели поступления заявок на передачу низкоскоростного трафика и для детерминированного распределения длительности интервала времени их обслуживания. В целях сокращения объема диссертационного исследования эти результаты здесь не приводятся. Отметим, что для получения численных данных в этих условиях достаточно в используемой имитационной

модели сети изменить процедуру формирования продолжительности промежутка времени обслуживания заявок. В расчетной программе это означает изменение всего лишь нескольких операторов. Это свойство — одно из отмеченных ранее положительных характеристик имитационного моделирования.

Для устранения отрицательных последствий неконтролируемого перераспределения ресурса передачи информации можно использовать два подхода. Первый — основан на реализации процедуры резервирования пропускной способности для обслуживания высокоскоростного трафика. В этой ситуации заявки на передачу низкоскоростного трафика будут получать отказ в доступе несмотря на наличие ресурса достаточного для их обслуживания. Таким образом можно сделать примерно равными значения потерь заявок всех потоков. Однако это приведет к недоиспользованию передаточных возможностей линий сети. Вторым подходом является в разделении потоков низкоскоростного и высокоскоростного трафика и передаче их по отдельным соединительным линиям. Таким образом можно опять сделать примерно равными значения потерь заявок разных потоков. Для каждого сценария требуется оценить эффективность использования канальной единицы, которая достигается за счет статистического мультиплексирования на шкале времени, относящейся к поступлению заявок. Для обоснования процедуры выбора конкретного сценария необходимо провести соответствующее теоретическое исследование с использованием моделей и алгоритмов, построенных в данной главе. Эта работа будет проделана в последующих главах диссертации.

2.6. Выводы

1. Разработана модель мультисервисной сети связи, состоящая из произвольного числа узлов и соединительных линий. Поступление заявок на

передачу трафика сервисов реального времени следует либо пуассоновской модели (низкоскоростной трафик), либо модели Энгсета (высокоскоростной трафик). В построенной модели предполагается, что вероятность допуска заявки к обслуживанию зависит как от наличия требуемого количества свободных единиц канального ресурса, необходимого для обслуживания трафика ассоциированного с обслуживанием поступающей заявки, так и от степени загрузки ресурса передачи информации в используемом маршруте ее пересылки по сети. Разработанная модель может быть использована для оценки достаточности ресурса в звеньях сети связи при совместном обслуживании мультисервисного трафика коммуникационных приложений реального времени.

2. В рамках построенной модели сформулированы определения основным характеристикам качества совместного обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Значения характеристик могут быть найдены с помощью решения системы уравнений статистического равновесия или использования процедуры просеивания потока поступающих заявок.

3. Показано, что точный расчет значений характеристик возможен только в частных случаях разработанной модели, когда сеть состоит из одного или двух звеньев. Для оценки характеристик в общем случае разработана имитационная модель. Сформулированы процедуры формирования интервалов времени между поступлением заявок на выделение канального ресурса, а также продолжительности времени удерживания канального ресурса на их обслуживание.

4. С помощью результатов имитационного моделирования мультисервисных сетей общего вида показано, что при совместном использовании канального ресурса на обслуживание неоднородного трафика реального времени наблюдается неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми

потребностями в ресурсе передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается применять либо резервирование, либо раздельное использование ресурса звеньев сети. Для обоснования процедуры выбора конкретного сценария можно использовать построенные в данной главе модели и алгоритмы.

Глава 3

Алгоритмы расчета характеристик совместного использования ресурса мультисервисных линий связи

3.1. Введение

Численные алгоритмы оценки характеристик качества совместного обслуживания заявок в мультисервисных сетях обычно основаны либо на реализации точных методов расчета частных случаев исследуемой модели, представляющих из себя однозвенные конструкции с несколькими входными потоками заявок, либо на реализации приближенных методов, также построенных с помощью однозвенных моделей. В данной главе оба этих подхода будут использованы для численного анализа исследуемой модели мультисервисной сети. В разделе 3.2 построена и исследована двухпоточковая модель звена. Один поток образован конечной группой пользователей. Предполагается, что поступающие заявки относятся к обслуживанию высокоскоростного трафика видеоприложений. Второй поток относится к обслуживанию низкоскоростного трафика речевых коммуникационных приложений. Для данной модели приведено математическое описание, построена система уравнений равновесия, даны определения характеристик через значения стационарных вероятностей, рассмотрен алгоритм оценки характеристик, основанный на решении системы уравнений равновесия численными методами. В разделе 3.3 приведена методика оценки характеристик анализируемой модели мультисервисной сети, основанная на реализации метода просеивания поступающего потока заявок. В разделе 3.4 сформулированы выводы по главе.

3.2. Оценка характеристик двухпоточковой модели звена с возможностью внутренних блокировок

3.2.1 Поступление и обслуживание заявок

Анализируемая модель представляет из себя отдельное звено исследуемой мультисервисной сети. На линию связи со скоростью передачи информации, выраженной через ν канальных единиц поступают два потока заявок. Один поток образован конечной группой пользователей. Предполагается, что поступающие заявки относятся к обслуживанию высокоскоростного трафика видеоприложений.

Обозначим через s число абонентов сети, формирующих анализируемую группу пользователей услуг высокоскоростной связи. Абонент сети, входящий в состав этой группы посылает заявку на передачу ресурсоемкого трафика реального времени через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным β_1 . Для передачи трафика, ассоциированного с обслуживанием поступившей заявки, требуется b_1 канальных единиц. Далее возможны два варианта развития событий. Если в используемом ресурсе имеется необходимое число свободных канальных единиц, то все они занимают на случайное время обслуживания поступившей заявки, имеющее экспоненциальное распределение с параметром равным α_1 . Таким образом, среднее время обслуживания заявки равно $\frac{1}{\alpha_1}$.

Если требуемого числа свободных канальных единиц не хватает, то абонент, являющийся источником анализируемой заявки, получает отказ и через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным β_1 , от него поступает следующая заявка и приведенные выше действия, связанные с формированием первого потока заявок,

повторяются.

Заявки на предоставление ресурса передачи информации, сформированные бесконечной группой пользователей услуг связи и принадлежащие второму потоку поступают в соответствии с пуассоновским распределением и имеют интенсивность λ_2 . Для обслуживания поступившей заявки требуется b_2 канальных единиц. Время обслуживания заявки второго потока, имеет экспоненциальное распределение с параметром равным α_2 . Таким образом, среднее время обслуживания заявки равно $\frac{1}{\alpha_2}$. Если требуемого числа свободных канальных единиц не хватает, то поступившая заявка получает отказ и не возобновляется.

Допуск низкоскоростных заявок к обслуживанию ограничен наличием процедуры резервирования ресурса. С общих позиций действие процедуры резервирования удобно формализовать с использованием понятия функции внутренней блокировки [53,57]. В отличие от модели резервирования, рассмотренной в предыдущей главе, аргументом функции блокировки будет не состояние числа заявок всех потоков, находящихся на обслуживании, а состояние числа занятых канальных единиц ресурса звена. Обозначим через i_1 число заявок, находящихся на обслуживании, ассоциированных с передачей высокоскоростного трафика. Обозначим через i_2 число заявок, находящихся на обслуживании, ассоциированных с передачей низкоскоростного трафика. Обозначим через (i_1, i_2) состояние числа заявок обоих потоков, находящихся на обслуживании в момент поступления заявки второго потока. Общее число занятых в этот момент канальных единиц определяется из соотношения $i = i_1 b_1 + i_2 b_2$.

Обозначим через $\varphi_2(i)$ значение функции внутренней блокировки. Единственным аргументом функции является общее число занятых в этот

момент канальных единиц i . Значения $\varphi_2(i)$ должны отражать невозможность приема поступившей заявки второго потока из-за нехватки ресурса передачи информации. Следовательно, должны выполняться соотношения

$$\varphi_2(v - b_2 + 1) = 1, \quad \varphi_2(v - b_2 + 2) = 1, \dots, \varphi_2(v - 1) = 1, \quad \varphi_2(v) = 1.$$

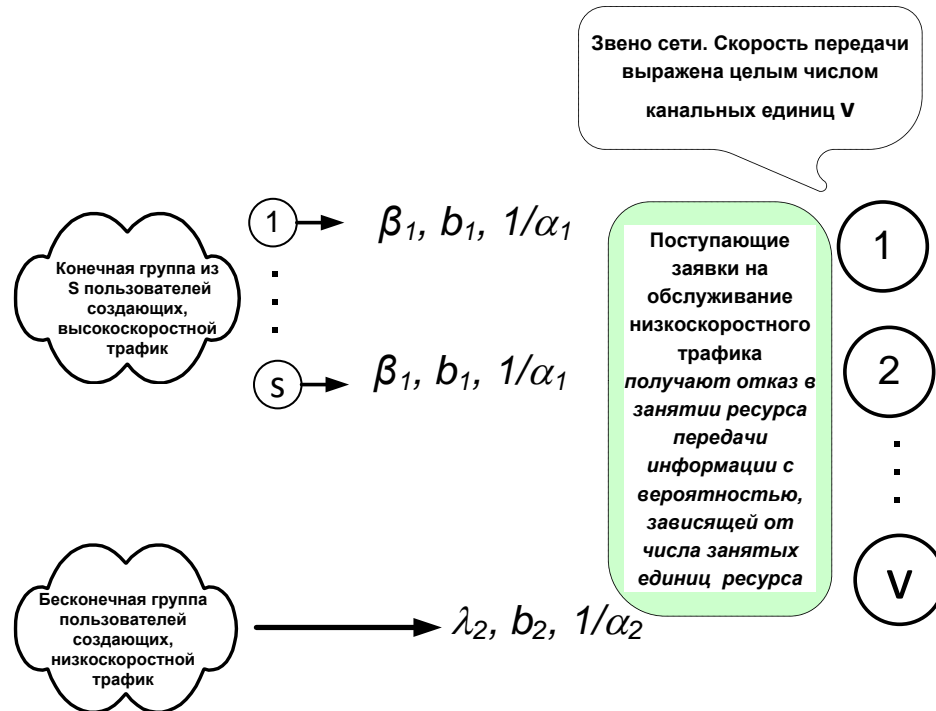


Рис. 3.1. Процедура формирования потоков поступающих заявок в анализируемой однозвенной двухпотоковой модели. Показаны зависимость интенсивности поступающих заявок от числа пользователей услуг связи и действие механизма контроля за допуском, основанное на общем числе занятых канальных единиц линии

Если для обслуживания высокоскоростного трафика резервируется канальный ресурс в объеме f_2 единиц, то выбор значений функции внутренней

блокировки задается соотношениями

$$\varphi_2(v - f_2 + 1) = 1, \quad \varphi_2(v - f_2 + 2) = 1, \dots, \varphi_2(v - 1) = 1, \quad \varphi_2(v) = 1.$$

Обычно величина f_2 определяется из равенства $f_2 = b_1$. Процедура формирования потоков поступающих заявок в соответствии с изложенной выше схемой приведена на рисунке 3.1. Показана зависимость интенсивности поступающих заявок от числа пользователей услуг связи и действие механизма контроля за допуском, основанное на общем числе занятых канальных единиц линии.

3.2.2 Математическое описание модели звена

В соответствии с общими положениями теории телетрафика [57] построение математической модели звена определяется тем перечнем характеристик качества обслуживания поступающих заявок, которые будут оцениваться с помощью построенной модели. Основная область использования анализируемых моделей относится к планированию пропускной способности звена, т.е. к оценке скорости передачи информации соединительной линии или линии доступа, требуемой для обслуживания поступающих заявок с заданным качеством. Обычно качество обслуживания поступающих заявок оценивается долей потерянных заявок. Для вычисления данной характеристики работы звена сети достаточно знать долю времени пребывания модели звена в состоянии с фиксированным числом заявок каждого из двух имеющихся потоков заявок, находящихся на обслуживании. Выполненное обсуждение постановки задачи задаёт вид пространства состояний исследуемой двухпоточковой мультисервисной линии и структуру случайного процесса, описывающего динамику их изменения.

Обозначим через $i_1(t)$ число заявок на передачу высокоскоростного трафика, находящихся в момент времени t на обслуживании, а через $i_2(t)$ обозначим число заявок на передачу низкоскоростного трафика, находящихся в момент времени t на обслуживании. Динамика изменения с течением времени числа обслуживаемых заявок каждого из имеющихся потоков описывается двумерным случайным процессом

$$r(t) = (i_1(t), i_2(t)),$$

определённым на конечном пространстве состояний Ω . Оно состоит из векторов (i_1, i_2) , удовлетворяющих условию

$$i = i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v.$$

Не все состояния из пространства состояний Ω могут реально использоваться при построении модели. Выбор реально используемых состояний (обозначим их множество через S) определяется видом конкретных значений функции внутренней блокировки. Соответствующие примеры приведены в [57]. Обозначим через B_1 множество состояний модели, когда поступившая заявка на передачу высокоскоростного трафика получает отказ в обслуживании из-за нехватки требуемого количества канальных единиц линии. Состояние (i_1, i_2) принадлежит множеству состояний B_1 , если выполняется соотношение $i_1 b_1 + i_2 b_2 \geq v - b_1 + 1$.

3.2.3. Характеристики качества обслуживания заявок

По построению модели можно утверждать, что процесс $r(t)$ — марковский. Этот результат следует из предположения об экспоненциальном характере распределения интервала времени между поступлением заявок и продолжительности промежутка времени их обслуживания, а также из независимости этих временных интервалов друг от друга. Обозначим через

$P(i_1, i_2)$ — стационарную вероятность того, что на обслуживании находятся i_1 заявок на передачу высокоскоростного трафика и i_2 заявок на передачу низкоскоростного трафика. В соответствии с интерпретацией стационарных (предельных) вероятностей марковского процесса $r(t)$ значение вероятности $P(i_1, i_2)$ представляет из себя долю времени пребывания линии в состоянии (i_1, i_2) .

Данная интерпретация позволяет получить расчетные выражения для искомых характеристик качества обслуживания поступающих потоков заявок. К ним относятся: $\pi_{c,1}$ — доля потерянных заявок на передачу высокоскоростного трафика; m_1 — среднее число канальных единиц линии занятых на обслуживание высокоскоростного трафика; $\pi_{c,2}$ — доля потерянных заявок на передачу низкоскоростного трафика; m_2 — среднее число канальных единиц линии занятых на обслуживание низкоскоростного трафика.

Приведем формальные выражения для оценки введенных показателей. Они имеют следующий вид

$$\pi_{c,1} = \frac{\sum_{(i_1, i_2) \in B_1} P(i_1, i_2)(s - i_1)\beta_1}{\sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2)(s - i_1)\beta_1}; \quad (3.1)$$

$$m_1 = \sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2)i_1b_1;$$

$$\pi_{c,2} = \sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2)\varphi_2(i);$$

$$m_2 = \sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2)i_2b_2.$$

В приведенном выражении для $\pi_{c,2}$ $i = i_1b_1 + i_2b_2$. Если известны значения m_1 и m_2 , то можно найти величины y_1 — среднего числа заявок на передачу высокоскоростного трафика, находящихся на обслуживании и y_2 — среднего

числа заявок на передачу низкоскоростного трафика, находящихся на обслуживании. Расчетные выражения имеют вид:

$$y_1 = \frac{m_1}{b_1}, \quad y_2 = \frac{m_2}{b_2}. \quad (3.2)$$

Процесс обслуживания заявок, поступающих от конечных групп пользователей, также принято характеризовать значениями $\pi_{t,1}$ долей времени, когда поступившей заявке будет отказано в обслуживании из-за недостаточности свободного канального ресурса (эту характеристику иногда также называют вероятностью потерь по времени), и $\pi_{\ell,1}$ долей потерянных соединений от среднего числа потенциальных соединений. Значение a_1 среднего числа потенциальных соединений для потока заявок, поступающих от конечного числа пользователей услуг связи, находится из следующего выражения [57]:

$$a_1 = s \cdot \frac{\beta_1}{\alpha_1} / \left(1 + \frac{\beta_1}{\alpha_1}\right).$$

Обе характеристики определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \pi_{t,1} &= \sum_{(i_1, i_2) \in B_1} P(i_1, i_2); \\ \pi_{\ell,1} &= \frac{a_1 - \sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2) i_1}{a_1}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Величина $\pi_{\ell,1}$ показывает упущенную выгоду, которая обычно характеризуется долей потерянных соединений. Известно, что для пуассоновского потока значения доли времени недоступности канального ресурса, доли потерянных заявок на установление соединения и доли потерянных соединений совпадают.

3.2.4. Система уравнений статистического равновесия

Для оценки характеристик модели в соответствии с введенными определениями необходимо составить и решить систему уравнений статистического равновесия, связывающую значения стационарных вероятностей $P(i_1, i_2)$. Решим эту задачу используя стандартные приемы, развитые в теории телетрафика [3,53,57]. Для составления системы уравнений равновесия необходимо для всех состояний модели приравнять суммарную интенсивность выхода $r(t)$ из состояния (i_1, i_2) к суммарной интенсивности перехода $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) . Пусть в состоянии (i_1, i_2) $i = i_1 b_1 + i_2 b_2$.

В анализируемой модели имеются четыре вида событий, меняющих состояние (i_1, i_2) : поступление заявок на передачу высокоскоростного трафика (интенсивность $(s - i_1)\beta_1$), поступление заявок на передачу низкоскоростного трафика (интенсивность λ_2), освобождение одной из i_1 заявок на передачу высокоскоростного трафика (интенсивность $i_1\alpha_1$), освобождение одной из i_2 заявок на передачу низкоскоростного трафика (интенсивность $i_2\alpha_2$). Рассмотрим реализацию перечисленных событий, приводящую к выходу из состояния (i_1, i_2) , а также к переходу в состояние (i_1, i_2) и сформируем систему уравнений равновесия анализируемой модели. Получим выражение для левой части произвольного уравнения системы уравнений статистического равновесия. Для решения этой задачи надо найти условия реализации всех перечисленных выше событий и выписать интенсивность выхода из (i_1, i_2) . Рассмотрим соответствующие события и интенсивности их осуществления.

Поступление заявки на передачу высокоскоростного трафика (интенсивность $(s - i_1)\beta_1$) меняет состояние (i_1, i_2) с вероятностью единица, если есть свободные каналы для обслуживания поступившей заявки (т.е. для всех (i_1, i_2) , удовлетворяющих условию $i \leq v - b_1$). В этом случае с

интенсивностью $P(i_1, i_2)(s - i_1)\beta_1$ совершается переход из состояния (i_1, i_2) в состояние $(i_1 + 1, i_2)$. Поступление заявки на передачу низкоскоростного трафика (интенсивность λ_2) меняет состояние (i_1, i_2) , когда механизм допуска заявок принимает решение о ее приеме на обслуживание. Указанное действие выполняется с вероятностью $1 - \varphi_2(i)$. В этом случае с интенсивностью $P(i_1, i_2)\lambda_2(1 - \varphi_2(i))$ совершается переход из состояния (i_1, i_2) в состояние $(i_1, i_2 + 1)$.

Окончание обслуживания заявки на передачу высокоскоростного трафика (интенсивность $i_1\alpha_1$) меняет состояние (i_1, i_2) с вероятностью единица, если на обслуживании имеются соответствующие заявки (т.е. для всех (i_1, i_2) , удовлетворяющих условию $i_1 > 0$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1, i_2)i_1\alpha_1$ совершается переход из состояния (i_1, i_2) в состояние $(i_1 - 1, i_2)$. Окончание обслуживания заявки на передачу низкоскоростного трафика (интенсивность $i_2\alpha_2$) меняет состояние (i_1, i_2) с вероятностью единица, если на обслуживании имеются соответствующие заявки (т.е. для всех (i_1, i_2) , удовлетворяющих условию $i_2 > 0$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1, i_2)i_2\alpha_2$ совершается переход из состояния (i_1, i_2) в состояние $(i_1, i_2 - 1)$.

Четыре слагаемых левой части системы уравнений равновесия получены. Для построения правой части произвольного уравнения системы уравнений статистического равновесия в той же последовательности рассматриваются перечисленные выше события, которые меняют состояние $r(t)$ и находятся состояния, условия и интенсивности переходов в заданное состояние (i_1, i_2) анализируемой модели. Рассмотрим соответствующие события и интенсивности их осуществления.

Переход случайного процесса $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) может произойти в

результате поступление заявки на передачу высокоскоростного трафика в состоянии $(i_1 - 1, i_2)$ (интенсивность $(s - i_1 + 1)\beta_1$). Условием осуществления события является принадлежность состояния $(i_1 - 1, i_2)$ пространству состояний модели S (т.е. компоненты состояния (i_1, i_2) должны удовлетворять условию $i_1 > 0$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1 - 1, i_2)(s - i_1 + 1)\beta_1$ совершается переход из состояния $(i_1 - 1, i_2)$ в состояние (i_1, i_2) . Переход $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) может произойти в результате поступление заявки на передачу низкоскоростного трафика, если механизм допуска заявок принимает решение о ее приеме на обслуживание. Указанное действие выполняется с вероятностью $(1 - \varphi_2(i - b_2))$ в состоянии $(i_1, i_2 - 1)$ (интенсивность $\lambda_2(1 - \varphi_2(i - b_2))$). Условием осуществления события является принадлежность состояния $(i_1, i_2 - 1)$ пространству состояний модели S (т.е. компоненты состояния (i_1, i_2) должны удовлетворять условию $i_2 > 0$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1, i_2 - 1)\lambda_2(1 - \varphi_2(i - b_2))$ совершается переход из состояния $(i_1, i_2 - 1)$ в состояние (i_1, i_2) . Другие две возможности перехода случайного процесса $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) связаны с окончанием обслуживания заявок. Рассматриваемый переход в состояние (i_1, i_2) может произойти в результате окончания обслуживания одной из $(i_1 + 1)$ заявок на передачу высокоскоростного трафика (интенсивность $(i_1 + 1)\alpha_1$). Условием осуществления события является принадлежность состояния $(i_1 + 1, i_2)$ пространству состояний модели S (т.е. компоненты состояния $(i_1 + 1, i_2)$ должны удовлетворять условию $i + b_1 \leq \nu$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1 + 1, i_2)(i_1 + 1)\alpha_1$ совершается переход из состояния $(i_1 + 1, i_2)$ в состояние (i_1, i_2) . Переход процесса $r(t)$ в состояние (i_1, i_2) может также произойти в результате окончания обслуживания одной из $(i_2 + 1)$ заявок на передачу

низкоскоростного трафика (интенсивность $(i_2 + 1)\alpha_2$). Условием осуществления события является принадлежность состояния $(i_1, i_2 + 1)$ пространству состояний модели S (т.е. компоненты состояния (i_1, i_2) должны удовлетворять условию $i + b_2 \leq v$). В этом случае с интенсивностью $P(i_1, i_2 + 1)(i_2 + 1)\alpha_2$ совершается переход из состояния $(i_1, i_2 + 1)$ в состояние (i_1, i_2) .

Приравняв левую и правые части уравнения равновесия и формально записав условия осуществления событий через индикаторную функцию $I(\cdot)$, получаем искомый вид системы уравнений равновесия

$$\begin{aligned}
 & P(i_1, i_2)((s - i_1)\beta_1 I(i \leq v - b_1) + \lambda_2(1 - \varphi_2(i)) + \\
 & \quad + i_1\alpha_1 I(i_1 > 0) + i_2\alpha_2 I(i_2 > 0)) = \\
 & = P(i_1 - 1, i_2)(s - i_1 + 1)\beta_1 I(i_1 > 0) + \\
 & + P(i_1, i_2 - 1)\lambda_2(1 - \varphi_2(i - b_2))I(i_2 > 0) + \\
 & + P(i_1 + 1, i_2)(i_1 + 1)\alpha_1 I(i + b_1 \leq v) + \\
 & + P(i_1, i_2 + 1)(i_2 + 1)\alpha_2 I(i + b_2 \leq v).
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Здесь и далее $I(\cdot)$ — индикаторная функция. Она принимает значение, равное единице, если условие сформулированное в скобках выполняется. Если условие не выполняется, то индикаторная функция равна нулю. Решение системы уравнений равновесия удовлетворяет условию нормировки

$$\sum_{(i_1, i_2) \in S} P(i_1, i_2) = 1.$$

Число уравнений в полученной системе уравнений равновесия

исчисляется несколькими тысячами. Для ее решения можно использовать стандартные алгоритмы, развитые в линейной алгебре.

3.2.5. Решение системы уравнений статистического равновесия

Выбор алгоритма решения системы уравнений равновесия во многом зависит от свойств матрицы (3.4). Как уже было сказано, число неизвестных в (3.4) может достигать нескольких тысяч. Это затрудняет, а порой и делает невозможным использование алгоритмов, основанных на последовательном исключении неизвестных или на блочных преобразованиях матрицы (3.4). По мнению экспертов [53,57] в этой ситуации целесообразно использовать итерационные методы решения (3.4), основанные на методе последовательных подстановок [53,57]. К таким методам относится итерационный метод Гаусса-Зейделя. Реализация метода значительно упрощается тем, что при его реализации не требуется запоминать матрицу (3.4), а достаточно вычислять ее коэффициенты в момент реализации каждого шага итерационного алгоритма. Общая схема реализации данного подхода изложена в [53,57]. Сформулируем основные шаги алгоритма.

Обозначим через $P^{(k)}(i_1, i_2)$, $(i_1, i_2) \in S$ значение k -го приближения, полученного в результате реализации итерационной процедуры Гаусса-Зейделя. Значения $(k+1)$ -го приближения получаются из k -го приближения с помощью рекурсивных соотношений, которые следуют из (3.4) в результате применения итерационной процедуры Гаусса-Зейделя и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 P(i_1, i_2)^{(k+1)} &= \\
 &= \frac{1}{(s - i_1)\beta_1 I(i \leq v - b_1) + \lambda_2(1 - \varphi_2(i)) + i_1\alpha_1 I(i_1 > 0) + i_2\alpha_2 I(i_2 > 0)} \times \\
 &\quad \times \left[P^{(k+1, k)}(i_1 - 1, i_2)(s - i_1 + 1)\beta_1 I(i_1 > 0) + \right.
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
& +P^{(k+1,k)}(i_1, i_2 - 1)\lambda_2(1 - \varphi_2(i - b_2))I(i_2 > 0) + \\
& +P^{(k+1,k)}(i_1 + 1, i_2)(i_1 + 1)\alpha_1 I(i + b_1 \leq v) + \\
& +P^{(k+1,k)}(i_1, i_2 + 1)(i_2 + 1)\alpha_2 I(i + b_2 \leq v) \Big].
\end{aligned}$$

Символ $P^{(k+1,k)}(i_1, i_2)$ означает, что при выборе величины $P^{(k+1,k)}(i_1, i_2)$ используется $(k+1)$ -ое приближение, если же оно неизвестно, то известное k -ое приближение. Реализация итерационной схемы требует определения начальных значений итерационного цикла и формулировки критерия окончания итерационного счета. Из известных теоретических положений [57] следует, что при выборе начального приближения можно воспользоваться соотношениями

$$P^{(0)}(i_1, i_2) = 1, \quad (i_1, i_2) \in S.$$

Итерационный цикл оканчивается при выполнении неравенства

$$\frac{\sum_{(i_1, i_2) \in S} |P^{(k+1)}(i_1, i_2) - P^{(k)}(i_1, i_2)|}{\sum_{(i_1, i_2) \in S} P^{(k)}(i_1, i_2)} < \delta,$$

где величина δ выбирается из условия $\delta < 10^{-8} \text{ — } 10^{-10}$.

3.2.6. Численный анализ совместного обслуживания заявок

Воспользуемся построенной моделью и разработанным алгоритмом оценки характеристик и выполним численный анализ совместного обслуживания заявок на передачу неоднородного трафика. Вначале исследуем особенности обслуживания заявок в условиях, когда имеется существенная разница между величинами требований к ресурсу между высокоскоростным трафиком и низкоскоростным. Рассмотрим звено сети, которое обслуживает два потока заявок на передачу трафика реального времени. Скорость передачи

информации на звене выражена целым числом канальных единиц ν .

Первый поток образован группой из $s = 10$ абонентов. Создаваемая ими нагрузка на обслуживание высокоскоростного трафика a_1 меняется от 0 до 2 потенциальных соединений. Для обслуживания одного соединения требуется b_1 единица канального ресурса линии. Второй поток образован группой, размеры которой не влияют на интенсивность производимого ими потока заявок. Создаваемая ими нагрузка на обслуживание низкоскоростного трафика a_2 меняется от 0 до 100 потенциальных соединений. Для обслуживания одного соединения требуется b_2 единиц канального ресурса линии. Будем предполагать, что $b_1 = 50$ к.е., а $b_2 = 1$ к.е.

На рисунке 3.2 для анализируемой модели звена приведены зависимости доли потерянных заявок, соответственно для 1-го (значение $\pi_{c,1}$) и 2-го (значение $\pi_{c,2}$) потоков от изменения a_1 и a_2 в указанных выше пределах. Параметр экспоненциального распределения времени обслуживания заявки для каждого потока принят равным единице, т.е. $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. Отсюда следует, что $\gamma_1 = \frac{a_1}{s - a_1}$, а $\lambda_2 = a_2$. Значения потерь подсчитаны для 40 точек в соответствии с выражениями: $a_2[i] = 2,5 \times i$; $a_1[i] = a_2[i] / b_1$, $i = 1, 2, \dots, 40$. По оси абсцисс отложено значение $\rho = \frac{a_1[i] b_1 + a_2[i]}{\nu}$. Оно показывает величину потенциальной загрузки единицы канального ресурса звена анализируемой модели сети, выраженную в эрланго-каналах [57]. Цифрой 1 обозначена диаграмма для 1-го потока (высокоскоростной трафик), а цифрой 2 — для 2-го потока (низкоскоростной трафик).

Из приведенных результатов следует, что несмотря на существенный рост потенциальной загрузки линии (отметим, что потенциальные величины низкоскоростного и высокоскоростного трафика, выраженные в эрланго-

каналах, совпадают во всем диапазоне изменения поступающей нагрузки) для низкоскоростного трафика доля потерянных заявок увеличивается не столь быстро, как для высокоскоростного трафика. Более того на отдельных участках изменения трафика доля потерянных заявок может и значительно уменьшаться. Этот результат аналогичен свойству, отмеченному в разделе 2.5 при численном

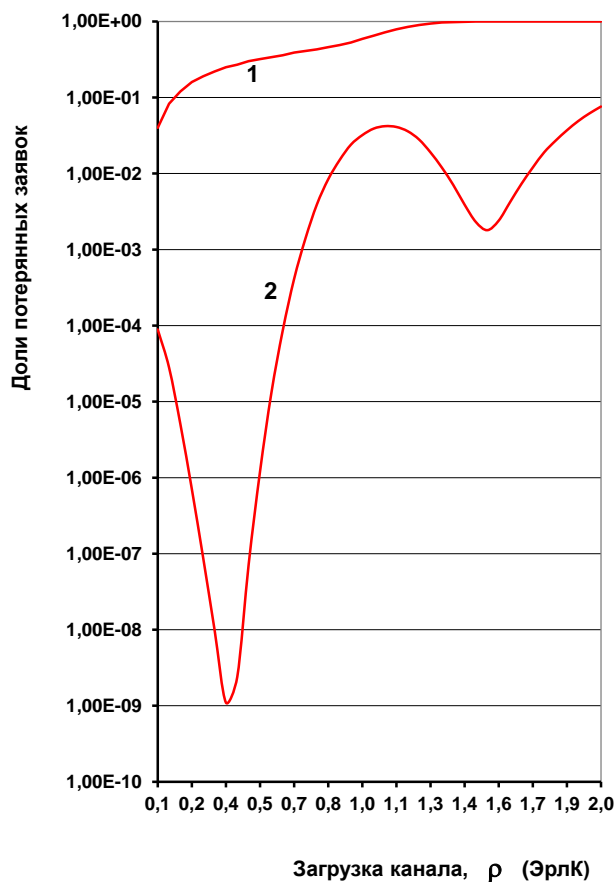


Рис. 3.2. Зависимость доли потерянных заявок для 1-го и 2-го потоков трафика реального времени от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

исследовании модели мультисервисной сети и сравнении значений доли потерянных вызовов. Вытеснение высокоскоростных заявок из обслуживания может принять катастрофический характер. Этот результат показан на рисунке

3.3 для тех же значений входных параметров анализируемой модели звена, что были использованы при расчете данных, приведенных на рисунке 3.2. На рисунке показаны зависимости среднего числа единиц канального ресурса занятых высокоскоростным (кривая 1 характеристика m_1) и низкоскоростным (кривая 2 характеристика m_2) трафиком. Отметим, что на начальной стадии роста поступающей нагрузки оба потока занимают одинаковое среднее число канальных единиц поскольку создают одинаковую потенциальную загрузку канального ресурса линии.

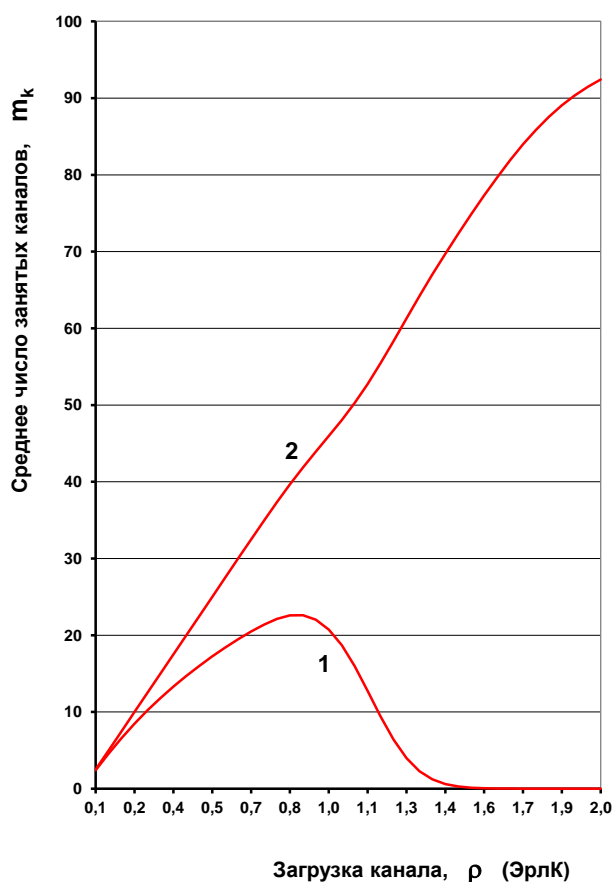


Рис. 3.3. Зависимость среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание низкоскоростного (кривая 1) и высокоскоростного (кривая 2) трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из ПОТОКОВ

Понятно, что отмеченные на рисунке 3.2, и 3.3 проблемы совместного обслуживания неоднородного трафика усиливают свой характер с ростом отношения b_1 к b_2 , т.е. чем больше единиц канального ресурса требуется для обслуживания одной заявки высокоскоростного трафика по сравнению с числом единиц ресурса необходимого для обслуживания одной заявки низкоскоростного трафика тем выше степень осцилляции доли потерянных заявок низкоскоростного трафика и степень вытеснения высокоскоростного трафика из обслуживания. Для иллюстрации зависимости характеристик совместного обслуживания заявок на передачу мультисервисного трафика реального времени от отношения b_1 к b_2 рассмотрим численный пример.

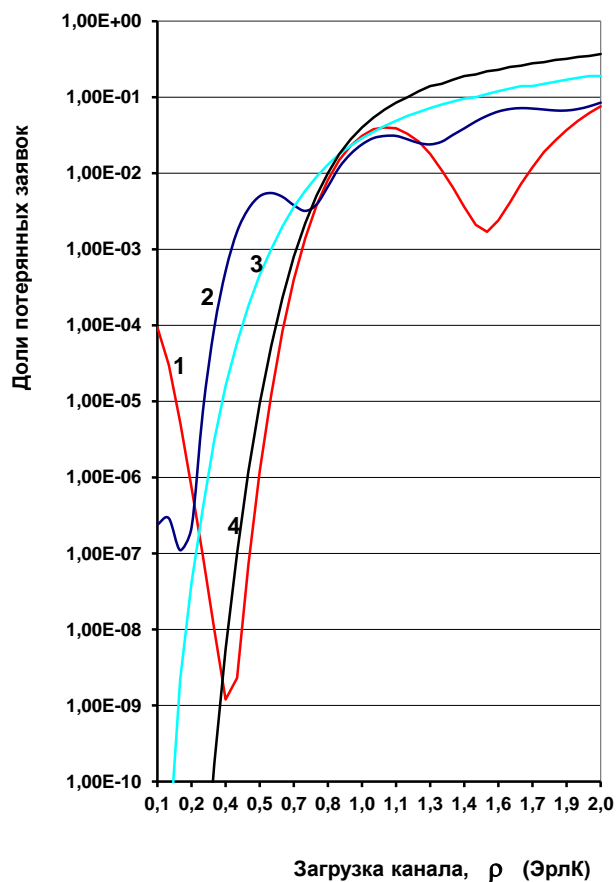


Рис. 3.4. Зависимость доли потерянных заявок на передачу высокоскоростного трафика от величины канального ресурса необходимого для обслуживания одной заявки

На рисунке 3.4 для анализируемой модели звена приведены зависимости доли потерянных заявок на передачу высокоскоростного трафика от изменения a_1 и a_2 в пределах, использованных на рисунке 3.2, для значений $b_1 = 50$ к.е. (кривая с номером 1), $b_1 = 25$ к.е. (кривая с номером 2), $b_1 = 10$ к.е. (кривая с номером 3), $b_1 = 5$ к.е. (кривая с номером 4). Значение $s = 25$. Остальные параметры принимают те же величины, что были использованы при построении зависимостей, показанных на рисунке 3.2.

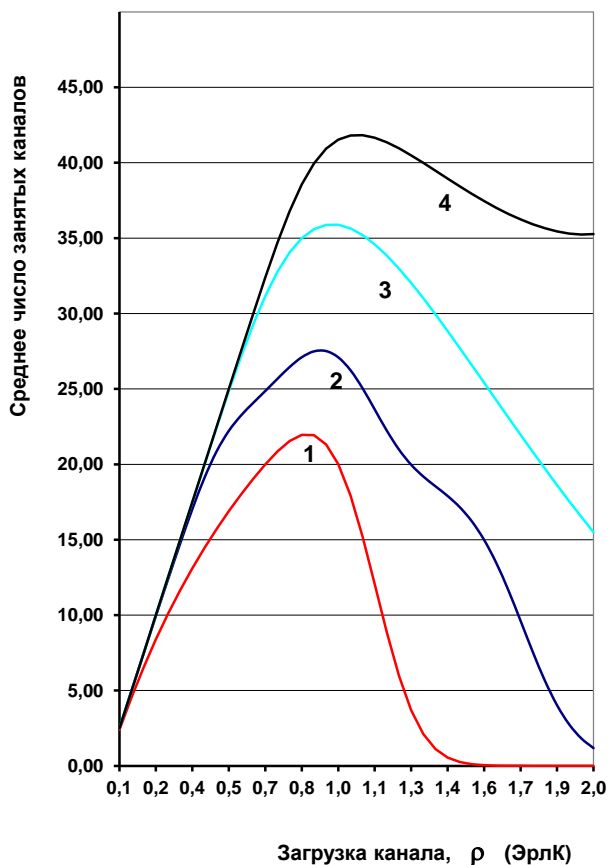


Рис. 3.5. Зависимость степени вытеснения высокоскоростного трафика из обслуживания с уменьшением отношения b_1 и b_2

Приведенные данные показывают, что локальные уменьшения величины потерь заявок на передачу низкоскоростного трафика с ростом общей нагрузки на линию исчезают, когда соотношение между значениями b_1 и b_2 становится

менее, чем 10—15. В анализируемой ситуации также уменьшается степень вытеснения высокоскоростного трафика из обслуживания. Результаты, иллюстрирующие это положение, показаны на рисунке 3.5 для значений $b_1 = 50$ к.е. (кривая с номером 1), $b_1 = 25$ к.е. (кривая с номером 2), $b_1 = 10$ к.е. (кривая с номером 3), $b_1 = 5$ к.е. (кривая с номером 4). Значение $s = 25$. Остальные параметры принимают те же величины, что были использованы при построении зависимостей, показанных на рисунке 3.2.

Для того, чтобы гарантировать приемлемый уровень качества обслуживания высокоскоростного трафика необходимо реализовать процедуру резервирования канального ресурса для их передачи. Построенная модель дает возможность оценить получаемый при этом эффект.

Вернемся к модели звена, численно исследованной на рисунке 3.2, и применим процедуру резервирования ресурса для улучшения качества обслуживания высокоскоростного трафика реального времени. Реализация процедуры означает сокращение доступа к канальному ресурсу заявок на передачу низкоскоростного трафика. Если для обслуживания высокоскоростного трафика резервируется канальный ресурс в объеме f_2 единиц, то выбор значений функции внутренней блокировки, регулирующий процедуру приема заявок на передачу низкоскоростного трафика, задается соотношениями

$$\begin{aligned} \varphi_2(v - f_2 + 1) = 1, \quad \varphi_2(v - f_2 + 2) = 1, \dots, \\ \varphi_2(v - 1) = 1, \quad \varphi_2(v) = 1. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Обычно величина f_2 определяется из равенства $f_2 = b_1$. На рисунке 3.6 показаны зависимости доли потерянных заявок на передачу высокоскоростного (кривая 1) и низкоскоростного (кривая 2) трафика от изменения a_1 и a_2 в пределах, использованных на рисунке 3.2, для значений $b_1 = 50$ к.е.

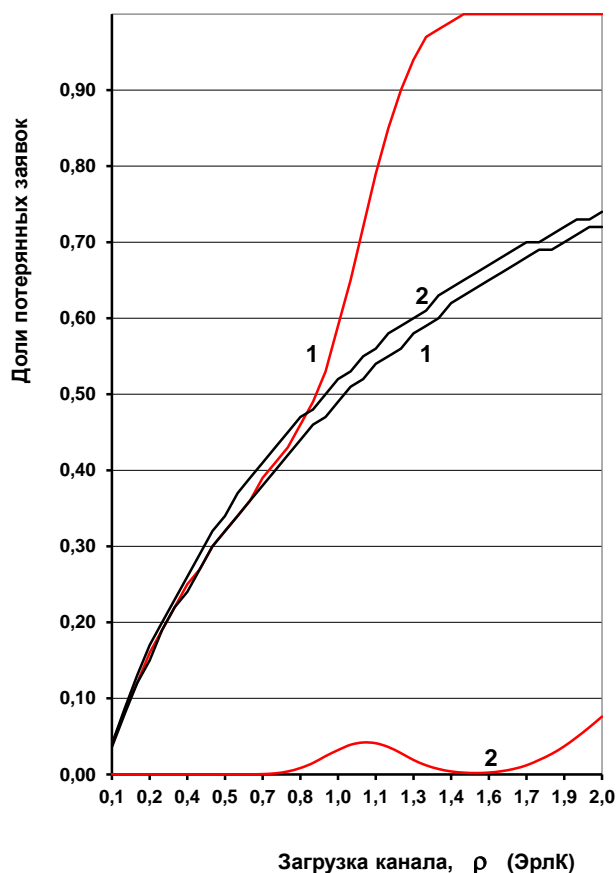


Рис. 3.6. Результат использования функции внутренней блокировки для выравнивания доли потерь на передачу высокоскоростного (кривая 1) и низкоскоростного (кривая 2) трафика

На этом же рисунке показаны значения этих же зависимостей после реализации процедуры резервирования канального ресурса для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика. Функция внутренней блокировки, регулирующая процедуру приема заявок на передачу низкоскоростного трафика, задается соотношениями (3.6). Разница в значениях потерь низкоскоростного и высокоскоростного трафика после реализации процедуры резервирования связана с тем, что в моделях с учетом конечного числа пользователей вероятности потерь по времени и по вызовам различаются между собой. Используемая процедура резервирования делает

равными для обоих потоков значения потерь по времени.

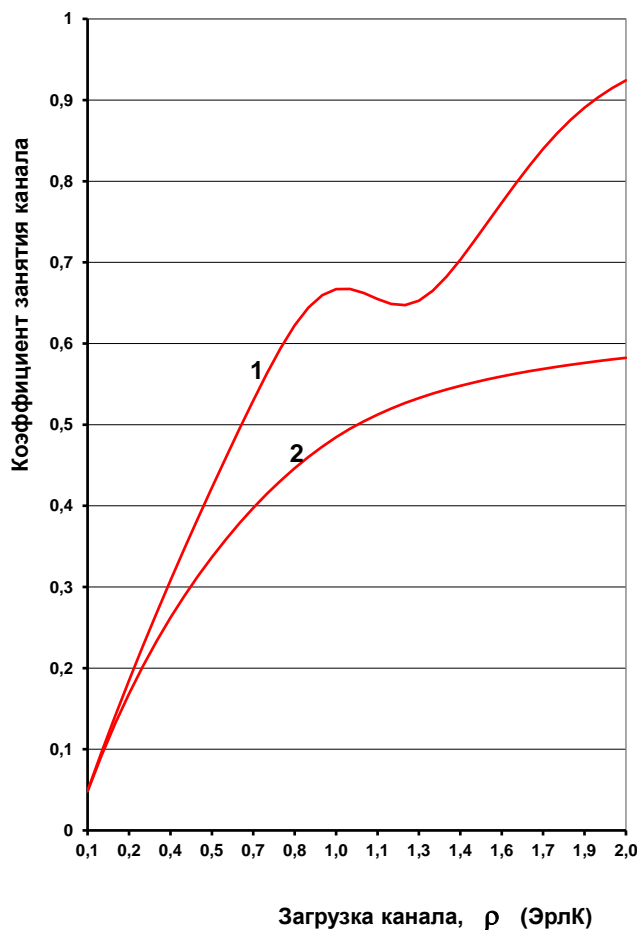


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента использования единицы канального ресурса до (кривая 1) и после (кривая 2) применения процедуры резервирования

Приведенные на рисунке данные показывают, что применение процедуры резервирования решает поставленную задачу. Значения потерь заявок выравниваются. Однако достигается это в результате недоиспользования передаточных возможностей линии связи. Приведем графические данные, иллюстрирующие это положение. На рисунке 3.7 показаны зависимости δ коэффициента использования единицы канального ресурса до (кривая 1) и

после (кривая 2) применения процедуры резервирования. Величина δ определяется из соотношения

$$\delta = \frac{m_1 + m_2}{v}. \quad (3.7)$$

3.3. Приближенная оценка характеристик мультисервисного трафика при наличии внутренней блокировки

3.3.1 Общие положения метода просеивания заявок

Анализ характеристик совместного обслуживания заявок на передачу широкополосного и узкополосного трафика реального времени, выполненный в рамках построенной модели звена с учетом функции внутренней блокировки и конечным числом абонентов, создающих высокоскоростную нагрузку, показал появление возможности неконтролируемого перераспределения ресурса передачи линии связи, резко ухудшающего качество обслуживания высокоскоростного трафика. Для устранения этого эффекта предлагается использовать процедуры резервирования общего ресурса в пользу отдельных потоков или его отдельное использование. Выбор конкретного сценария зависит от соотношения между входными параметрами обслуживаемых информационных потоков и требует теоретического обоснования. Сделать это можно при наличии подходящих численных алгоритмов расчета характеристик качества обслуживания поступающих потоков. Рассмотрим пути решения этой задачи для модели мультисервисной сети. Возможность резервирования ресурса будет реализована с помощью функции внутренней блокировки.

Для приближённой оценки характеристик модели мультисервисной сети с учетом внутренней блокировки предлагается использовать метод просеивания заявок. Название рассматриваемый алгоритм получил по схеме

учёта зависимости между вероятностями потерь поступающих заявок на установление соединения на отдельных звеньях сети. В основе алгоритма лежит предположение о том, что эти вероятности не зависят друг от друга. По этой причине доля потерянных заявок получается простым перемножением значений вероятностей потерь заявок на отдельных звеньях маршрута пересылки информации, относящейся к обслуживанию рассматриваемого потока заявок.

Данный алгоритм называется методом просеивания потока заявок. Реализация метода основана на учете отказов в выделении ресурса передачи информации для обслуживания рассматриваемой заявки на этапах установления соединения до и после j -й линии, входящей в состав маршрута следования трафика, относящегося к ее обслуживанию и на использовании известных моделей отдельных звеньев сети при оценке характеристик модели. Рассматриваемый подход может быть использован для разного класса моделей систем связи в том числе и учитывающих возможность внутренней блокировки [57]. Приведем основные положения метода и затем рассмотрим его модификацию на случай обслуживания заявок в мультисервисной сети при наличии внутренних блокировок.

Обозначим через $D_{k,j}$ долю заявок k -го потока нагрузки, потерянных на j -м звене анализируемой модели сети. Схема функционирования модели и основные обозначения приведены в разделе 2.2 По определению $(1 - D_{k,j})$ — вероятность просеивания заявок k -го потока на j -м звене сети. Предположим, что потери заявок на отдельных звеньях сети не зависят друг от друга. Тогда для оценки значения π_k вероятности потерь заявок k -го потока можно использовать выражение:

$$\pi_k \approx 1 - \prod_{j \in R_k} (1 - D_{k,j}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.7)$$

Для реализации алгоритма осталось воспользоваться каким-либо алгоритмом оценки значений $D_{k,j}$. Когда речь идет об оценке характеристик обслуживания заявок на передачу мультисервисного трафика можно использовать рекурсивный алгоритм [110]. Приведем основные расчетные выражения.

Введем параметры модели отдельного j -го звена сети: v_j — число единиц канального ресурса; $g_{\ell,j}$ — интенсивность поступления заявок ℓ -го потока, выраженная в эрлангах, (т.е. в среднем числе заявок, поступающих за среднее время обслуживания одной заявки), b_ℓ — число канальных единиц, используемое для обслуживания одной заявки. В приведенных выражениях $\ell \in N_j$ — номер потока заявок на передачу трафика реального времени, использующих j -е звено сети. Для оценки значений $D_{k,j}$ можно воспользоваться выражением

$$D_{k,j} = \sum_{i=v_j-b_k+1}^{v_j} P(i), \quad k \in N_j. \quad (3.8)$$

Для определения $P(i)$ используется рекурсия

$$P(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^{n_j} g_{\ell,j} b_k P(i - b_k) I(i - b_k \geq 0), \quad (3.9)$$

где $I(\cdot)$ — индикаторная функция, введенная при записи системы уравнений равновесия (3.3), n_j — число потоков мультисервисного трафика, использующих ресурс звена, $g_{\ell,j}$ — интенсивность поступления заявок k -го потока, выраженная в эрлангах. Начальное значение рекурсии $P(0)$ берется равным единице.

Характеристика $D_{k,j}$ зависит от $g_{\ell,j}$ и b_{ℓ} , где $\ell \in N_j$. Эту зависимость принято обозначать в форме функции $F_{k,j}(v_j; (g_{\ell,j}; b_{\ell}), \ell \in N_j)$. На j -ое звено сети поступает поток заявок, которые не получили отказ на всех звеньях ℓ -го маршрута кроме j -го звена. Вероятности $D_{k,j}$ потерь заявок на всех звеньях сети известны и не зависят друг от друга. Отсюда получаем выражение для оценки интенсивностей $g_{\ell,j}$ в форме соотношения

$$g_{\ell,j} = a_{\ell} \prod_{u \in R_{\ell} \setminus \{j\}} (1 - D_{\ell,u}). \quad (3.10)$$

Если значения интенсивностей $g_{\ell,j}$ известны, то после их подстановки в рекурсивные выражения (3.9) и использования (3.10) находим величины потерь заявок $D_{k,j}$. В результате выполненных преобразований получаем систему неявных уравнений для нахождения значений $D_{k,j}$:

$$D_{k,j} = F_{k,j}(v_j; (a_{\ell} \prod_{u \in R_{\ell} \setminus \{j\}} (1 - D_{\ell,u}); b_{\ell}), \ell \in N_j), \quad (3.11)$$

$$j = 1, 2, \dots, J; \quad k \in N_j.$$

Построенная система неявных уравнений решается методом подстановок. Расчетные выражения имеют вид [110]:

$$D_{k,1}^{(s)} = F_{k,1}(v_1; (a_{\ell} \prod_{u \in R_{\ell} \setminus \{1\}} (1 - D_{\ell,u}^{(s,s-1)}); b_{\ell}), \ell \in N_1), \quad k \in N_1; \quad (3.12)$$

$$D_{k,2}^{(s)} = F_{k,2}(v_2; (a_{\ell} \prod_{u \in R_{\ell} \setminus \{2\}} (1 - D_{\ell,u}^{(s,s-1)}); b_{\ell}), \ell \in N_2), \quad k \in N_2;$$

.

$$D_{k,J}^{(s)} = F_{k,J}(v_J; (a_{\ell} \prod_{u \in R_{\ell} \setminus \{J\}} (1 - D_{\ell,u}^{(s,s-1)}); b_{\ell}), \ell \in N_J), \quad k \in N_J.$$

с начальным условием:

$$D_{k,j}^{(0)} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad k \in N_j.$$

Реализация метода подстановок оканчивается, когда нормированная разность между последовательными приближениями $D_{k,j}^{(s)}$, $j = 1, 2, \dots, J$, $k \in N_j$, становится меньше некоторой малой величины, например, 10^{-8} . Верхний индекс в выражении $D_{\ell,u}^{(s,s-1)}$ означает использование на s -м шаге найденных к этому времени значений $D_{\ell,u}^{(s)}$, а если таковых нет, то использование значений $D_{\ell,u}^{(s-1)}$, полученных на $(s-1)$ -ом шаге. Величины $D_{k,j}^{(s)}$, найденные на последнем шаге реализации метода подстановок, будут приближенными значениями $D_{k,j}$ потерь заявок k -го потока на j -ом звене сети. Значения характеристик качества обслуживания поступающих заявок π_k следуют из соотношений (3.7) после подстановки найденных величин $D_{k,j}$.

Результаты численных расчетов и сравнение полученных приближенных значений с их точными величинами, найденными в результате имитационного моделирования [53,57], показали, что метод просеивания заявок имеет хорошую точность достаточную для решения большинства практических задач.

3.3.2. Реализация метода просеивания заявок для сети с внутренними блокировками

Модель сети с внутренними блокировками введена и исследована в разделе 3.2. Там же перечислены основные параметры и характеристики модели. Воспользуемся этими результатами при изложении материала данного раздела. Формулировка метода просеивания заявок для сети с внутренними блокировками следует общей схеме, изложенной в предыдущем разделе для модели мультисервисной сети без учета вероятности внутренних блокировок. Опираясь на эти результаты приведем формулировку расчетного алгоритма.

Как и раньше обозначим через $D_{k,j}$ долю заявок k -го потока нагрузки, потерянных на j -ом звене анализируемой модели сети. Величина $(1 - D_{k,j})$ будет использоваться как вероятность просеивания заявок k -го потока на j -м звене сети. При этом используется предположение, что потери заявок на отдельных звеньях сети не зависят друг от друга. Тогда для оценки значения π_k вероятности потерь заявок k -го потока можно использовать выражение, совпадающее с (3.7):

$$\pi_k \approx 1 - \prod_{j \in R_k} (1 - D_{k,j}), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.13)$$

Для применения алгоритма необходимо рассчитать значения $D_{k,j}$. Для оценки введенных характеристик можно использовать два подхода. Первый — основан на составлении и решении системы уравнений равновесия для модели звена при наличии вероятности внутренней блокировки, второй — основан на приближенной оценке характеристик звена с помощью специальным образом составленного рекурсивного соотношения. Рассмотрим основные этапы реализации каждого из этих подходов. Начнем с составления и решения системы уравнений равновесия. Обозначим через n общее число потоков заявок на передачу трафика реального времени, поступающих на линию со скоростью передачи информации, выраженной целым числом канальных единиц v . Поступление заявок k -го потока подчиняется закону Пуассона с интенсивностью λ_k , время обслуживания заявки имеет экспоненциальное распределение с параметром α_k , для обслуживания одной заявки требуется b_k канальных единиц.

Обозначим через $\varphi_k(i)$ значение функции внутренней блокировки для заявок k -го потока. Единственным аргументом функции является общее число канальных единиц i , занятых в момент поступления заявки k -го потока на

обслуживание. Для значений $\varphi_k(i)$ выполняются соотношения

$$\varphi_k(v - b_k + 1) = 1, \quad \varphi_2(v - b_k + 2) = 1, \dots, \varphi_k(v - 1) = 1, \quad \varphi_k(v) = 1.$$

В остальных случаях выбор функции внутренней блокировки зависит от технической политики оператора.

По построению модели можно утверждать, что процесс $r(t)$ — марковский. Этот результат следует из предположения об экспоненциальном характере распределения интервала времени между поступлением заявок и продолжительности промежутка времени их обслуживания, а также из независимости этих временных интервалов друг от друга. Обозначим через $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ стационарную вероятность того, что на обслуживании находятся i_1 заявка первого потока, i_2 заявок второго потока, . . . , i_n заявок n -го потока. Состояние (i_1, i_2, \dots, i_n) принадлежит пространству состояний S исследуемой модели, если для компонент (i_1, i_2, \dots, i_n) выполняется соотношение $i_1 b_1 + i_2 b_2 + \dots + i_n b_n \leq v$.

В соответствии с интерпретацией стационарных (предельных) вероятностей марковского процесса $r(t)$ значение вероятности $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ представляет из себя долю времени пребывания линии в состоянии (i_1, i_2, \dots, i_n) . Отсюда нетрудно получить расчетные выражения для характеристик качества обслуживания поступающих потоков заявок. Обозначим через $\pi_{c,k}$ долю потерянных заявок k -го потока (величина данной характеристики дает значение $D_{k,j}$ — доли заявок k -го потока нагрузки, потерянных на j -м звене анализируемой модели сети, которое используется при реализации метода просеивания потока поступающих заявок), а через m_k обозначим среднее число канальных единиц линии занятых на обслуживание заявок k -го потока.

Для оценки значений $\pi_{c,k}$ и m_k $k=1, 2, \dots, n$ используются выражения:

$$\pi_{c,k} = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) \varphi_k(i), \quad (3.14)$$

$$m_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k, \quad (3.15)$$

где $i_1 b_1 + i_2 b_2 + \dots + i_n b_n = i$.

Для оценки значений $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ необходимо составить и решить систему уравнений равновесия. Используя общий подход [57], получаем следующую систему соотношений

$$\begin{aligned} P(i_1, i_2, \dots, i_n) \sum_{k=1}^n (\lambda_k (1 - \varphi_k(i)) + i_k \alpha_k I(i_k > 0)) = & \quad (3.16) \\ = \sum_{k=1}^n P(i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k (1 - \varphi_k(i - b_k)) I(i_k > 0) + \\ + \sum_{k=1}^n P(i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \alpha_k I((i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) \in S), \\ (i_1, i_2, \dots, i_n) \in S. \end{aligned}$$

Значения $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ удовлетворяют условию нормировки. Численные величины вероятностей $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$, а с ними и значения $D_{k,j}$ находятся после решения системы уравнений равновесия итерационным методом, изложенным в разделе 3.2.5. Величины $\pi_{c,k}$, а с ними и значения $D_{k,j}$ можно оценить с помощью приближенных алгоритмов. Воспользовавшись [57] приведем основные расчетные формулы.

Преобразуем выражения для оценки $\pi_{c,k}$ к следующему виду:

$$\begin{aligned} \pi_{c,k} &= \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) \varphi_k(i) = & (3.17) \\ &= \sum_{i=0}^v \sum_{i_1 b_1 + \dots + i_n b_n = i} P(i_1, i_2, \dots, i_n) \varphi_k(i) = \sum_{i=0}^v P(i) \varphi_k(i), \end{aligned}$$

где
$$P(i) = \sum_{i_1 b_1 + \dots + i_n b_n = i} P(i_1, i_2, \dots, i_n), \quad i = 0, 1, \dots, v.$$

Для приближенной оценки значений $P(i)$ используется рекурсия

$$P(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^n a_k b_k P(i - b_k) (1 - \varphi_k(i - b_k)) I(i - b_k \geq 0), \quad (3.18)$$

аналогичная (3.9). В приведенном рекурсивном соотношении $a_k = \frac{\lambda_k}{\alpha_k}$, $k = 1, 2, \dots, n$, — интенсивность предложенного трафика, выраженная в эрлангах. Последовательность реализации (3.18) аналогична процедуре, использованной в (3.9). Вначале необходимо положить $P(0) = 1$ и затем выразить значения $P(i)$ для $i = 1, 2, \dots, v$ через значение $P(0) = 1$, используя (3.18). Приближенные значения вероятностей $P(i)$, а с ними и приближенные величины вероятности потерь поступающих заявок $D_{k,j}$ находятся после нормировки. Численные исследования [53,57] показали, что данный подход имеет хорошую точность.

После определения значений $D_{k,j}$ можно перейти к изложению основных этапов реализации метода просеивания заявок при оценке доли потерянных заявок на сети с учетом внутренних блокировок. Реализация метода во многом аналогична процедуре, использованной в разделе 3.3.1. Выпишем формулы для оценки характеристик обслуживания заявок на j -ом звене. Вначале перечислим входные параметры модели звена: число канальных единиц — v_j , интенсивности поступления заявок ℓ -го потока, выраженные в эрлангах, — $g_\ell(j)$, число канальных единиц, необходимых для обслуживания одной заявки, — b_ℓ . Значения $D_{k,j}$ рассчитываются из выражений

$$D_{k,j} = \sum_{i=0}^{v_j} P(i) \varphi_k(i), \quad k \in N_j, \quad (3.19)$$

где вероятности $P(i)$ определяются либо после решения системы уравнений равновесия (3.16), либо после реализации рекурсии (3.18) с учетом введенных изменений входных параметров. В последнем случае используются приближенные значения $P(i)$.

Характеристики $D_{k,j}$ являются функциями параметров v_j и $g_\ell(j)$, $\ell \in N_j$. Обозначим эту зависимость в виде $F_{k,j}(v_j, g_\ell(j), \ell \in N_j)$. В соответствии с общими положениями метода просеивания заявок значения $g_\ell(j)$ определяются из формулы

$$g_\ell(j) = a_\ell \prod_{u \in R_\ell \setminus \{j\}} (1 - D_{\ell,u}). \quad (3.20)$$

Подставив найденное выражение для $g_\ell(j)$ в $F_{k,j}(v_j, g_\ell(j), \ell \in N_j)$, получаем систему неявных уравнений для определения $D_{k,j}$

$$D_{k,j} = F_{k,j} \left(v_j, a_\ell \prod_{u \in R_\ell \setminus \{j\}} (1 - D_{\ell,u}), \ell \in N_j \right), \quad (3.21)$$

$$j = 1, 2, \dots, J, \quad k \in N_j,$$

которая решается с помощью итерационной процедуры

$$D_{k,j}^{(s)} = F_{k,j} \left(v_j, a_\ell \prod_{u \in R_\ell \setminus \{j\}} (1 - D_{\ell,u}^{(s-1)}), \ell \in N_j \right), \quad (3.22)$$

$$j = 1, 2, \dots, J, \quad k \in N_j,$$

с начальным условием

$$D_{k,j}^{(0)} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad k \in N_j.$$

Сходимость (3.22) не доказана, но в большинстве практических ситуаций

она имеется. Оценка сходимости определяется сравнением нормированной разницы между последовательными приближениями. Рекомендации по применению и результаты использования построенных численных процедур для оценки значений доли потерянных заявок будут рассмотрены в следующей главе.

3.4. Выводы

1. Построена и исследована обобщенная двухпоточковая модель звена мультисервисной сети связи. Особенностью модели является наличие потока заявок от конечной группы пользователей. Это свойство дает возможность учесть зависимость скорости передачи информации, выделяемой пользователю услуг связи, от числа пользователей. Этот результат имеет важное значение при обслуживании потоков заявок на передачу высокоскоростного трафика мультимедийных приложений. Второй поток заявок относится к передаче низкоскоростного трафика. В этом случае заявка может получить отказ в обслуживании и при наличии достаточного объема ресурса передачи, если допуск заявки к обслуживанию ограничен реализацией процедуры резервирования.

2. С помощью построенной модели сформулированы определения для основных характеристик качества обслуживания поступающих заявок: доли потерянных заявок и среднего числа занятых единиц ресурса. Для оценки значений характеристик предлагается использовать алгоритм, основанный на составлении и решении системы уравнений равновесия итерационным методом Гаусса-Зейделя. Для эффективной реализации итерационного алгоритма получено представление системы уравнений равновесия анализируемой модели в виде одного уравнения с коэффициентами, вычисляемыми из значений целочисленных компонент состояния.

3. Построенные модель звена и алгоритмы оценки ее характеристик

были использованы для численного исследования показателей качества совместного обслуживания низкоскоростного и высокоскоростного трафика, которое показало, что при определенных соотношениях между входными параметрами низкоскоростной трафик может вытеснить из обслуживания высокоскоростной трафик. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается использовать либо резервирование, либо отдельное использование ресурса передачи информации.

4. Для оценки характеристик совместного обслуживания заявок на передачу низкоскоростного и высокоскоростного трафика предлагается использовать метод просеивания заявок. Сформулирована последовательность реализации отдельных этапов метода с учетом возможности блокировки заявки из-за наличия процедуры резервирования, ограничивающей ее допуск к обслуживанию.

Глава 4

Расчет скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени

4.1. Введение

Задача расчета скорости звеньев мультисервисной сети при обслуживании неоднородного трафика реального времени решается либо с помощью методов имитационного моделирования, либо с помощью приближенных алгоритмов, в большинстве своем основанных на методе просеивания поступающих заявок. Особенности реализации первого из отмеченных подходов рассмотрены в главе 2, второго — в главе 3. Основные этапы решения сформулированной задачи перечислены и проанализированы в разделе 4.2. Численное исследование поведения показателей качества совместного обслуживания низкоскоростного и высокоскоростного трафика показало, что при определенных соотношениях между параметрами поступающих потоков заявок низкоскоростной трафик может вытеснить из обслуживания высокоскоростной трафик. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается использовать либо резервирование, либо отдельное использование ресурса передачи информации. Выбор конкретного сценария использования ресурса передачи информации и рекомендации по совместному обслуживанию трафика реального времени в мультисервисных сетях сформулированы в разделе 4.3. В разделе 4.4 сформулированы выводы по главе.

4.2. Процедура оценки скорости звеньев мультисервисной сети

4.2.1. Структура модели сети

Рассмотрим модель мультисервисной сети, введенную в главе 2. Напомним основные параметры модели, которые будут использоваться для решения сформулированной задачи. В сети имеется некоторое число узлов, связанных между собой соединительными линиями. Звенья сети занумерованы и их общее число равно J . Через R_k обозначено множество номеров соединительных линий сети, используемых при обслуживании заявки k -го потока, через N_j обозначено множество номеров потоков заявок, при обслуживании которых используется j -ая линия сети, а через v_j обозначена скорость передачи j -ой линии сети $j=1, \dots, J$, выраженная в единицах канального ресурса, требуемого для обслуживания поступающих заявок на передачу трафика реального времени. Множество номеров линий, входящих в состав множества R_k , называется k -ым маршрутом.

В сети имеются n потоков заявок на установление соединения с целью передачи трафика сервисов реального времени. Из числа n рассматриваемых потоков n_1 потоков формируются группами, состоящими из конечного числа пользователей, а n_2 потоков группами, состоящими из бесконечного числа пользователей. Напомним, что через ω_1 обозначено множество номеров потоков заявок, формируемых группами из конечного числа пользователей услуг связи, а через ω_2 обозначено множество номеров потоков заявок, формируемых группами из бесконечного числа пользователей. Через s_k обозначено число абонентов, формирующих k -ую группу пользователей услуг связи, $k \in \omega_1$. Абонент сети, входящий в состав k -ой группы, где $k \in \omega_1$, посылает заявку на передачу высокоскоростного трафика реального времени через

случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным β_k . Абонент сети, входящий в состав k -ой группы, где $k \in \omega_2$, посылает заявку на передачу низкоскоростного трафика реального времени через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение с параметром равным λ_k . В каждом из двух рассмотренных случаев для обслуживания поступившей заявки требуется b_k единиц ресурса, в каждой линии сети, составляющий k -ый маршрут. Время обслуживания заявки имеет экспоненциальное распределение с параметром равным α_k .

4.2.2. Исходные данные

Будем считать заданной топологию сети, которая определяется маршрутной матрицей R . Если требуется выбрать наиболее эффективное решение по стоимостным или каким либо другим критериям, то анализируемых топологий может быть несколько. Однако при решении задачи оценки скорости звеньев мультисервисной сети топология сети, т.е. компоненты маршрутной матрицы считаются фиксированными. Конечной целью решаемой задачи является определение требуемой скорости передачи соединительных линий сети, другими словами значений v_j , $j = 1, 2, \dots, J$. Предполагаются заданными число поступающих потоков n ; их разбиение на группы n_1 и n_2 ($n_1 + n_2 = n$) в соответствии с учетом зависимости общей интенсивности поступления заявок от числа абонентов, образующих рассматриваемый поток заявок. Для каждого потока заданы величины среднего времени обслуживания заявки $\frac{1}{\alpha_k}$. Предполагается, что соответствующий промежуток времени имеет экспоненциальное распределение с параметром α_k .

Для каждого потока заданы величины интенсивности предложенного трафика a_k . Значение a_k определяет среднее число потенциальных соединений при обслуживании заявок k -го потока. К потенциальным относятся соединения, полученные в отсутствии потерь поступающих заявок k -го потока. Если анализируемый поток заявок образован бесконечной группой пользователей, то предполагается, что поступление заявок подчиняется закону Пуассона с интенсивностью λ_k и выполняется соотношение $a_k = \frac{\lambda_k}{\alpha_k}$, позволяющее найти значение параметра λ_k , определяющего частоту поступления заявок k -го потока. Если анализируемый поток заявок образован конечной группой пользователей, то предполагается известными их количество s_k . Выполняется соотношение $\gamma_k = \frac{a_k}{s_k - a_k}$, позволяющее найти значение параметра γ_k , определяющего частоту поступления заявок от одного абонента k -го потока. Перечисленные исходные данные известны либо из результатов измерений, либо определяются после проведения маркетинговых исследований.

4.2.3. Этапы реализации алгоритма

С тем, чтобы упростить решение сформулированной задачи, поиск значений скоростей звеньев сети будет осуществляться с помощью метода перебора. Поскольку данный подход предполагает итерационный способ решения задачи, то при его реализации необходимо построить процедуру выбора начальных значений параметров и характеристик, а также скоростей звеньев сети v_j , $j = 1, 2, \dots, J$, сформулировать процедуру перехода к следующему шагу и указать момент остановки итерационного алгоритма.

На первом этапе реализации алгоритма определяется перечень параметров

и характеристик, а также их значений, которые используются при решении задачи. В соответствии с обсуждением, выполненным в разделе 4.2.2 в указанный перечень входят: R ; n ; n_1 и n_2 ; α_k ; a_k ; λ_k , s_k ; γ_k , $k = 1, 2, \dots, n$. Начальные значения скорости звеньев сети v_j , $j = 1, 2, \dots, J$ могут быть известны заранее. Так происходит в ситуации, когда речь идет о модернизации действующей сети. Если рассматривается строительство новой сети, то для оценки начальных значений скорости соединительных линий, выраженной в канальных единицах, предлагается следующая процедура. Обозначим через $v_j^{(r)}$ значение скорости j -ой линии, полученное на r -ом шаге реализации итерационного метода. Тогда в качестве $v_j^{(0)}$ естественно взять целую часть суммарного значения потенциального трафика, выраженного в канальных единицах, при передаче которого по сети используется j -ая линия. В результате получаем следующую формулу для оценки $v_j^{(0)}$:

$$v_j^{(0)} = \lfloor \sum_{\ell \in N_j} a_\ell b_\ell \rfloor, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (4.1)$$

На втором этапе формулируется критерий остановки итерационного цикла. Он зависит от характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Наиболее простой алгоритм основан на использовании значений доли потерянных заявок $\pi_{c,k}$. В дальнейшем будет применяться этот критерий. Для оценки значений $\pi_{c,k}$ можно использовать либо алгоритм имитационного моделирования, либо метод просеивания заявок. Последний подход удобен тем, что позволяет легко рассчитать долю потерь заявок определенного потока на отдельных соединительных линиях сети.

Далее формулируется итерационная процедура перехода к следующему шагу алгоритма. Для этого рассматриваются значения доли потерянных заявок для всех n анализируемых потоков трафика. Находится номер k потока с

максимальным значением доли потерянных заявок. Потери заявок анализируемого k -го потока определяются потерями на каждом из звеньев k -го маршрута. Если для оценки потерь заявок k -го потока использовался метод просеивания заявок, то величины потерь $D_{k,j}$ заявок k -го потока на всех звеньях j , входящих в состав k -го маршрута, известны. Находится номер j звена с максимальным значением потерь заявок. Далее каналный ресурс j -го звена увеличивается на определенное число единиц и повторяется расчет значений доли потерянных заявок $\pi_{c,k}$, $k=1,2,\dots,n$. Найденные величины потерь используются для оценки значения функционала (в рассматриваемом случае это величина максимальных потерь поступающих заявок), определяющего достаточность ресурса звеньев сети. Если условие окончания итерационного цикла не выполняется, то осуществляется переход к следующему шагу алгоритма. Добавочное число единиц ресурса определяется опытным путем.

Интуитивно понятно, что увеличение пропускной способности звеньев сети ведет к уменьшению доли потерянных заявок. Действуя подобным образом, находятся значения скоростей звеньев сети v_j , $j=1,2,\dots,J$, при которых максимальное значение доли потерянных заявок $\pi_{c,k}$, $k=1,2,\dots,n$ будет меньше заданного значения π . Поскольку изложенный алгоритм относится к разряду эвристических, то пригодность полученного ответа следует оценить с помощью имитационного моделирования. Результаты численного анализа, выполненного на примере сети, приведенной на рисунке 4.1 (см. также примеры сетей, приведенные в [57]), показали, что рассмотренный итерационный подход достаточно быстро сходится к требуемому результату и отличается простотой реализации. Получаемый ответ не является оптимальным с точки зрения сформулированного критерия, но

близким к нему. Еще раз отметим, что приемлемость окончательного результата следует проверять с помощью имитационного моделирования. Пример реализации алгоритма будет рассмотрен в разделе 4.3.7.

4.3. Анализ методов эффективного занятия ресурса звеньев мультисервисной сети при обслуживании трафика реального времени

4.3.1. Входные параметры сети

Численное исследование, выполненное в разделах 2.5 и 3.2.6, показало наличие свойства неконтролируемого перераспределения ресурса передачи информации в пользу низкоскоростного трафика, в ситуации когда последний передается совместно с высокоскоростным трафиком мультимедийных приложений реального времени. В результате резко ухудшается качество обслуживания высокоскоростного трафика и, наоборот, низкоскоростной трафик получает преимущество в использовании ресурса передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления можно использовать два подхода. Первый сценарий основан на применении процедуры резервирования канального ресурса соединительной линии для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика. В этой ситуации заявки на передачу низкоскоростного трафика будут получать отказ в обслуживании несмотря на наличие ресурса достаточного для их обслуживания. Таким образом можно сделать примерно равными значения потерь заявок всех потоков. Второй сценарий заключается в разделении потоков низкоскоростного и высокоскоростного трафика и передаче их по отдельным соединительным линиям.

Для обоснованного выбора конкретного сценария необходимо провести соответствующее численное и теоретическое исследование с использованием моделей и алгоритмов, построенных в предыдущих главах. Начнем с анализа

результатов численных расчетов.

Возьмем в качестве примера сеть из 7 узлов и 6 соединительных линий, показанную на рисунке 4.1. Топология сети аналогична, представленной на рисунке 2.4, только с отчасти измененной структурой входных потоков.

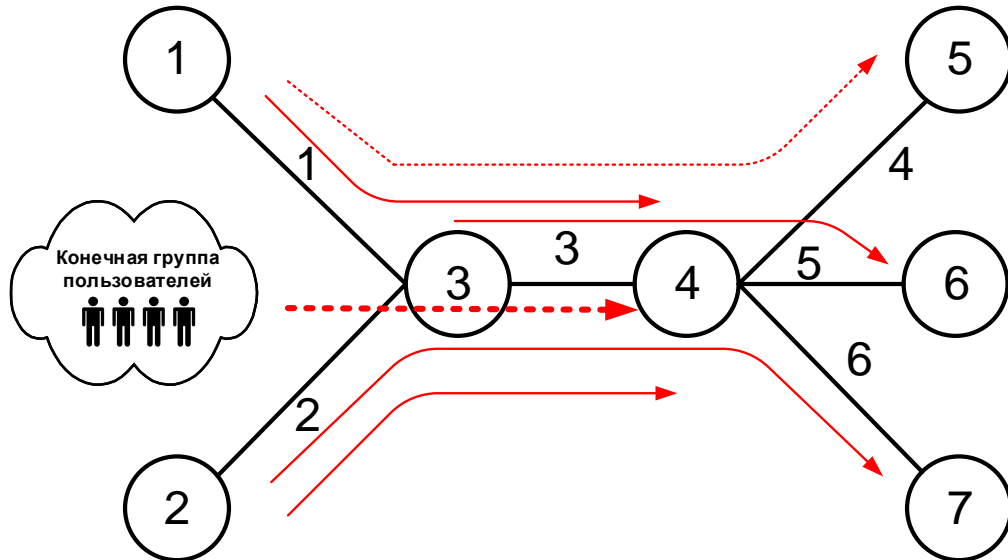


Рис. 4.1. Пример топологии сети, используемой для анализа сценариев повышения эффективности занятия ресурса передачи информации соединительных линий. Отмечены потоки трафика, связанные с обслуживанием заявок, использующих в качестве промежуточной соединительной линии 3-е звено сети

В анализируемой модели сети рассматривается процесс пересылки информации для 9 потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Маршруты следования потоков определяются следующим перечнем узлов: 1-ый — {1,3,2}, 2-ой — {1,3,4}, 3-ий — {1,3,4,5}, 4-ый — {3,4,6}, 5-ый — {2,3,4}, 6-ой — {2,3,4,7}, 7-ой — {5,4,6}, 8-ой — {5,4,7}, 9-ый — {3,4}.

Отметим последовательность занимаемых звеньев сети каждым потоком заявок: 1-ый — {1,2}, 2-ой — {1,3}, 3-ий — {1,3,4}, 4-ый — {3,5}, 5-ый —

{2,3}, 6-ой — {2,3,6}, 7-ой — {4,5}, 8-ой — {4,6}, 9-ой — {4}. На рисунке отмечены все потоки трафика, использующие в качестве промежуточной соединительной линии третье звено сети. Для простоты будем предполагать, что для обслуживания заявок всех потоков кроме девятого необходимо использование одной единицы канального ресурса (низкоскоростной трафик, например, относящийся к передаче речевых сообщений), а для обслуживания заявки девятого потока необходимо использование $b_9 > 1$ единиц канального ресурса (высокоскоростной трафик, например, относящийся к передаче видеосообщений). Выбор величины b_9 будет рассмотрен далее. Маршрутная матрица R , соответствующая выбранной топологии сети и маршрутам следования информационных потоков имеет вид

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & b_9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

4.3.2. Оценка характеристик совместного обслуживания неоднородного трафика

Предположим, что потоки заявок на установление низкоскоростного соединения поступают в соответствии с пуассоновским распределением, а поток заявок на установление высокоскоростного соединения образован конечной группой абонентов, которую для простоты будем считать равной $n_9 = 30$ пользователям. Для всех потоков заявок время обслуживания имеет экспоненциальное распределение с параметром равным единице, т.е. средняя продолжительность обслуживания принята за единицу.

В этой ситуации интенсивности поступления заявок выражены в

эрлангах, т.е. в среднем числе потенциальных соединений. Обозначим соответствующие интенсивности символом a_k , $k=1,2,\dots,9$. Для модели с конечным числом пользователей длительность интервала времени между поступлением заявок от одного абонента имеет экспоненциальное распределение с параметром γ_9 , определяемым из соотношения

$$a_9 = \frac{s_9 \cdot \gamma_9}{1 + \gamma_9}.$$

Отсюда следует, что величина γ_9 находится из формулы:

$$\gamma_9 = \frac{a_9}{s_9 - a_9}.$$

Величины характеристик совместного обслуживания заявок будут исследованы в зависимости от значений a_3 и a_9 при фиксированных значениях $a_k = 5$ Эрл, $k=1,2,\dots,n$, $k \neq 3$ и $k \neq 9$. Маршруты следования трафика, относящегося к обслуживанию заявок третьего и девятого потоков обозначены пунктиром. Приведем выражения для оценки значения d_k интенсивности предложенного трафика, проходящего через k -ое звено сети в соответствии с выбранной структурой маршрутной матрицы. Получаем такие формулы: $d_1 = a_1 + a_2 + a_3$; $d_2 = a_1 + a_5 + a_6$; $d_3 = a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_9$; $d_4 = a_3 + a_7 + a_8$; $d_5 = a_4 + a_7$; $d_6 = a_6 + a_8$. Подставив фиксированные значения интенсивностей, получаем такие результаты: $d_1 = (10 + a_3)$ Эрл; $d_2 = 15$ Эрл; $d_3 = (20 + a_3 + a_9)$ Эрл; $d_4 = (a_3 + 10)$ Эрл; $d_5 = 10$ Эрл; $d_6 = 10$ Эрл.

Число канальных единиц в звеньях сети выберем в соответствии с заданными значениями интенсивностей: $v_1 = 130$ к.е., $v_2 = 23$ к.е., $v_3 = 130$ к.е., $v_4 = 130$ к.е., $v_5 = 18$ к.е., $v_6 = 18$ к.е. Величину b_9 выберем из соотношения: $b_9 = 30$ к.е. Приводимые далее в этом разделе численные данные получены с

помощью алгоритма имитационного моделирования. Особенности реализации алгоритма рассмотрены в разделе 2.4. Эти же данные могут быть получены с использованием приближенных алгоритмов, основанных на методе просеивания заявок, рассмотренного в разделе 3.3. Выбор конкретной расчетной процедуры обсуждается в разделе 4.3.6.

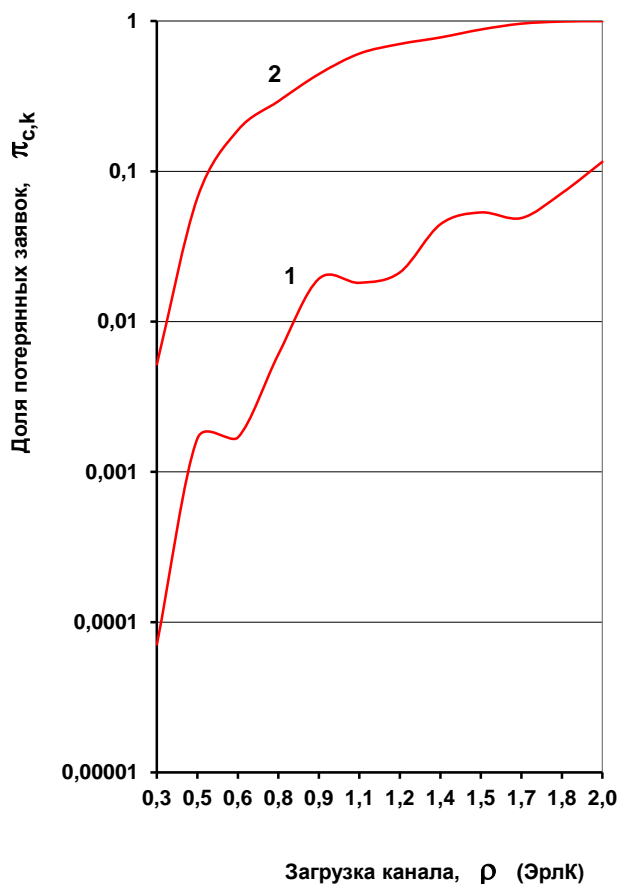


Рис. 4.2. Зависимость потерь заявок низкоскоростного и высокоскоростного трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

На рисунке 4.2 и 4.3 для анализируемой модели сети (см. рисунок 4.1) приведены зависимости для третьего (низкоскоростной трафик — кривая 1) и девятого (высокоскоростной трафик — кривая 2) потоков заявок соответственно доли потерянных заявок и среднего числа канальных единиц

заняты на обслуживание. Диаграммы построены в зависимости от изменения a_3 и $a_9 b_9$ в интервале от 0 до 120 ЭрлК. Значения характеристик подсчитаны для 12 точек в соответствии с выражениями: $a_3[i] = 10 \times i$; $a_9[i] = a_3[i] / b_9$, $i = 1, 2, \dots, 12$. По оси абсцисс отложено значение $\rho = \frac{a_2 + a_3[i] + a_4 + a_5 + a_6 + a_9[i] b_9}{v_3}$. Оно показывает величину потенциальной загрузки единицы канального ресурса третьего звена анализируемой модели сети, выраженную в эрланго-каналах [57].

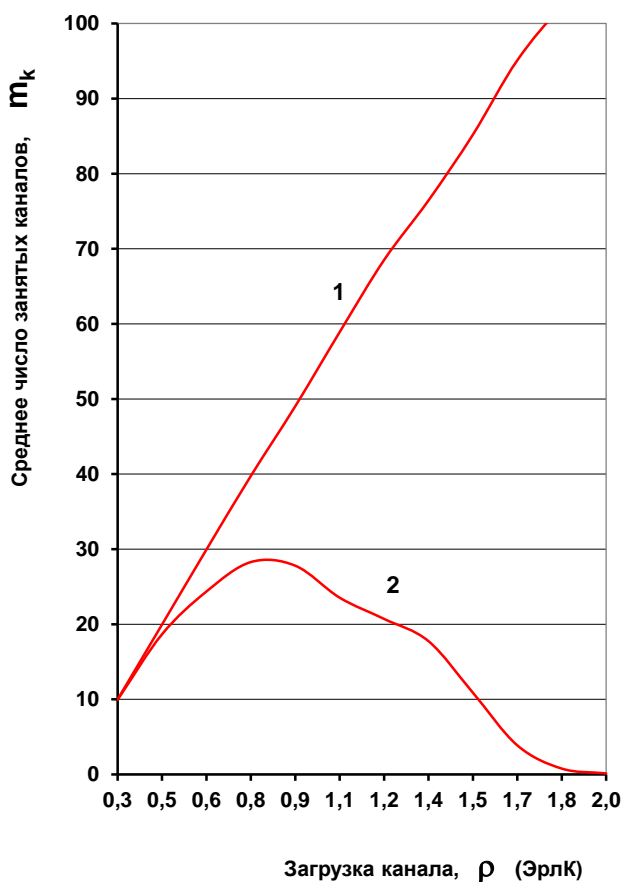


Рис. 4.3. Зависимость среднего числа канальных единиц третьей линии занятых на обслуживание низкоскоростного (третий поток заявок) и высокоскоростного (девятый поток заявок) трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков

4.3.3. Оценка характеристик при наличии механизма резервирования для высокоскоростного трафика

Приведенные данные показывают наличие отрицательных эффектов от совместного обслуживания неоднородного трафика, о которых шла речь в начале раздела. Воспользуемся процедурой резервирования передаточного ресурса третьей линии для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика. Будем предполагать, что для всех анализируемых информационных потоков заявки на передачу низкоскоростного трафика, проходящего через третью линию сети, получают отказ в обслуживании, если в момент их поступления на третьей линии сети занято $\nu_3 - b_9 + 1, \dots, \nu_3$ единиц канального ресурса (напомним, что величина b_9 выбрана из соотношения $b_9 = 30$ к.е.).

В остальной схеме функционирования и значения входных параметров исследуемой модели мультисервисной сети не меняются.

На рисунке 4.4 и 4.5 показано к каким изменениям в значениях характеристик третьего и девятого потоков приводит реализация процедуры резервирования. На рисунках приведены значения характеристик до реализации резервирования, взятые соответственно из содержания рисунка 4.2 и 4.3. Представленные данные показывают, что резервирование действительно практически выравнивает значения потерь заявок на передачу низкоскоростного (кривая 3) и высокоскоростного (кривая 4) трафика.

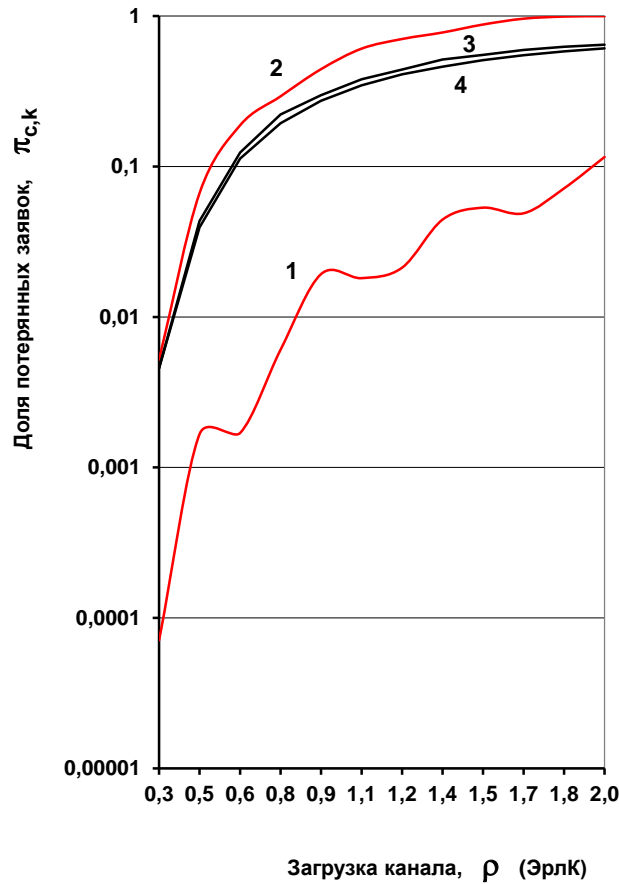


Рис. 4.4. Зависимость потерь заявок низкоскоростного и высокоскоростного трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков без (кривая 1,2) и при (кривая 3,4) наличии резервирования ресурса для обслуживания высокоскоростного трафика

Разница в значениях потерь низкоскоростного и высокоскоростного трафика после реализации процедуры резервирования связана с тем, что в моделях с учетом конечного числа пользователей вероятности потерь по времени и по вызовам различаются между собой. Используемая процедура резервирования делает равными для обоих потоков значения потерь по времени.

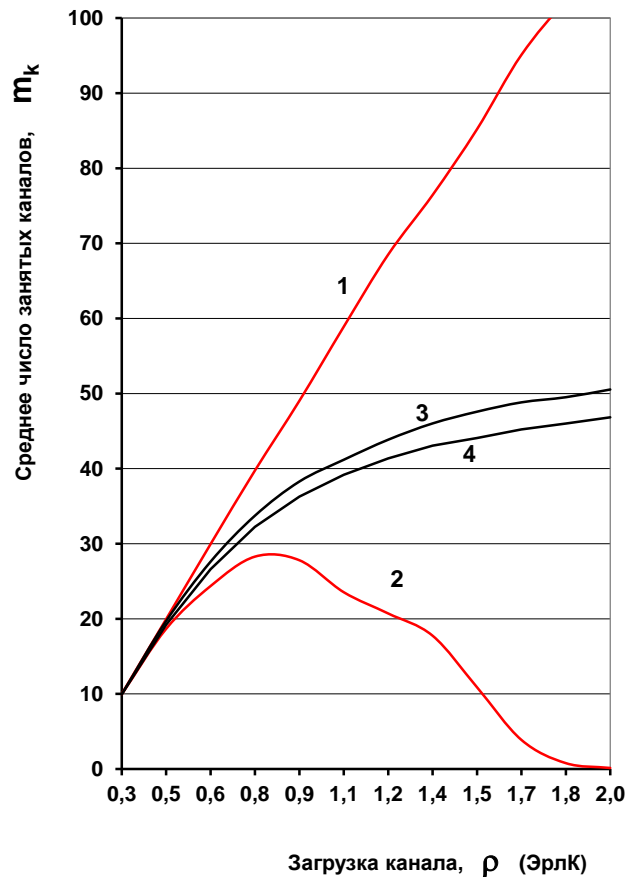


Рис. 4.5. Зависимость среднего числа канальных единиц третьей линии занятых на обслуживание низкоскоростного и высокоскоростного трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков без (кривая 1,2) и при наличии резервирования (кривая 3,4) для обслуживания высокоскоростного трафика

4.3.4. Оценка характеристик при действии механизма раздельного использования ресурса

Рассмотрим теперь действие процедуры раздельного занятия ресурса. Разделим ресурс третьего звена на две отдельные соединительные линии. Одна будет использоваться для обслуживания низкоскоростного трафика, другая линия будет использоваться только для обслуживания высокоскоростного трафика. Таким образом в анализируемой модели сети произойдут следующие

изменения. Число соединительных линий увеличится и будет определяться из соотношения $J = 7$. В остальном процесс занятия ресурса линий при обслуживании имеющихся в модели потоков трафика остается неизменным. Топология сети показана на рисунке 4.6.

Маршруты следования потоков, определяемые перечнем узлов, не меняются. Изменяться только последовательность занимаемых звеньев сети каждым потоком заявок: 1-ый — {1,2}, 2-ой — {1,3}, 3-ий — {1,3,5}, 4-ый — {3,6}, 5-ый — {2,3}, 6-ой — {2,3,7}, 7-ой — {4,5}, 8-ой — {5,7}, 9-ый — {4}.

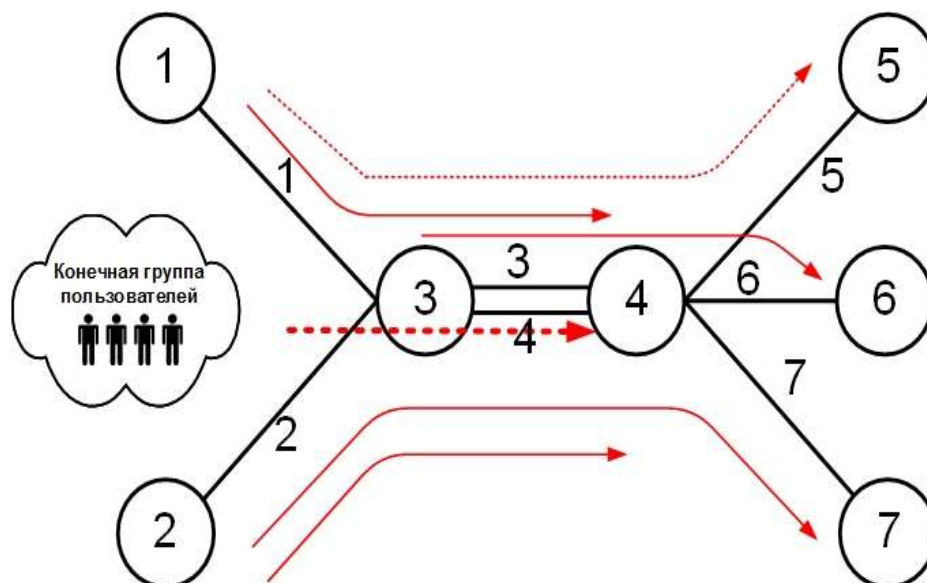


Рис. 4.6. Топология сети, используемой для анализа сценария раздельного использования ресурса соединительных линий при раздельном обслуживании низкоскоростного и высокоскоростного трафика

Маршрутная матрица R , соответствующая выбранной топологии сети и маршрутам следования информационных потоков имеет вид

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & b_9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Скорости передачи информации соединительных линий сети определяются в соответствии с величиной передаваемого трафика и задаются соотношениями: $v_1 = 130$ к.е., $v_2 = 23$ к.е., $v_3 = 70$ к.е., $v_4 = 60$ к.е., $v_5 = 130$ к.е., $v_6 = 18$ к.е., $v_7 = 18$ к.е. Остальные параметры анализируемой модели сети сохраняют свои значения.

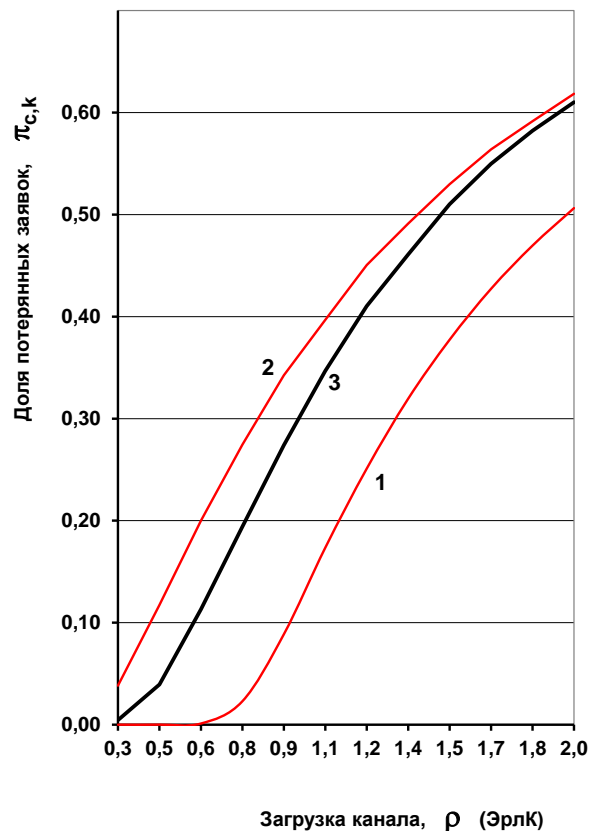


Рис. 4.7. Зависимость потерь заявок низкоскоростного и высокоскоростного трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков при наличии раздельного использования ресурса для обслуживания высокоскоростного трафика

На рисунке 4.7 и 4.8 показано к каким изменениям в значениях характеристик третьего (кривая 1) и девятого (кривая 2) потоков приводит реализация процедуры раздельного использования ресурса передачи третьей (в нумерации рисунка 4.1) соединительной линии. На рисунках показаны значения характеристик обслуживания третьего (низкоскоростного) потока трафика, полученные после использования механизма резервирования, взятые соответственно из содержания рисунка 4.4 и 4.5. Эти кривые обозначены цифрой 3.

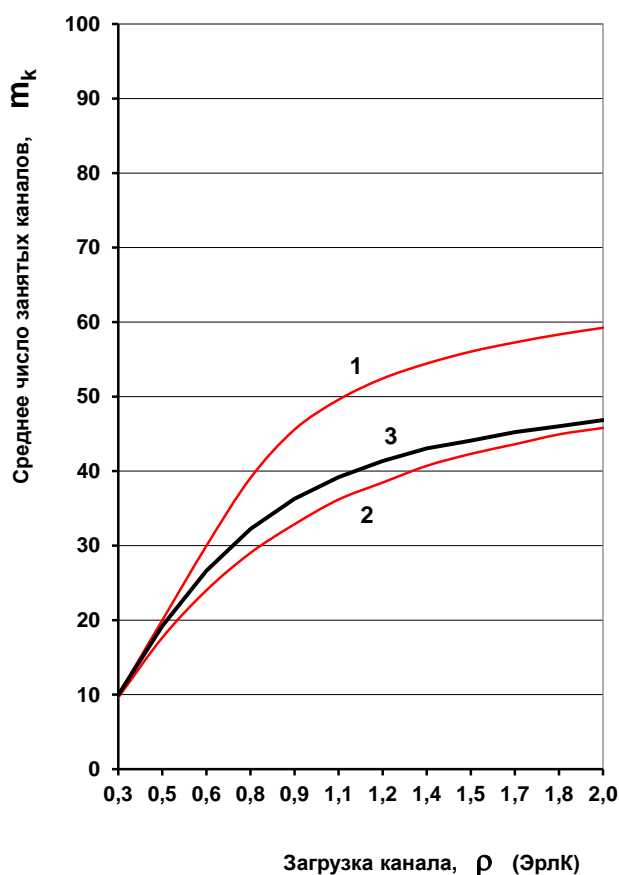


Рис. 4.8. Зависимость среднего числа канальных единиц третьей линии занятых на обслуживание низкоскоростного и высокоскоростного трафика от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков при наличии раздельного использования для обслуживания высокоскоростного трафика

4.3.5. Рекомендации по совместному обслуживанию трафика реального времени в мультисервисных сетях

Представленные данные показывают, что в принятых соотношениях между входными параметрами модели раздельное использование ресурса передачи информации более эффективно, чем резервирование. Действие механизма раздельного занятия ресурса в меньшей степени выравнивает значения потерь заявок низкоскоростного и высокоскоростного трафика, чем резервирование. Однако при его применении достигается большая эффективность в занятии единицы канального ресурса линии. На рисунке 4.9 показано, обозначенное цифрой 2, значение коэффициента использования единицы ресурса третьей линии (в нумерации рисунка 4.1), а также, обозначенное цифрой 1, значение коэффициента использования единицы ресурса третьей и четвертой линий (в нумерации рисунка 4.6), на обслуживание низкоскоростного и высокоскоростного трафика третьего и девятого потоков. Значение коэффициента получается в результате деления среднего числа единиц канального ресурса, занятых на обслуживание трафика третьего и девятого потоков, на величину ресурса, используемую этими потоками и равную в данном случае 130 к.е. Величина коэффициента найдена в зависимости от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков по схеме, использованной при построении графиков, представленных на рисунках 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, и 4.8. Анализируемые данные показывают, что в рассматриваемых условиях коэффициент использования единицы ресурса при раздельном занятии ресурса возрастает примерно на 10%.

Результаты численного исследования совместного обслуживания неоднородного трафика демонстрируют, что при разбросе требований к скорости передачи информации, превышающем 20–30 раз, может оказаться невыгодным с точки зрения эффективности загрузки единицы канального ресурса использование резервирования ресурса для выравнивания показателей

качества совместного обслуживания низкоскоростного и высокоскоростного трафика по сравнению с применением для этих же целей раздельного использования общего ресурса на передачу низкоскоростного и высокоскоростного трафика.

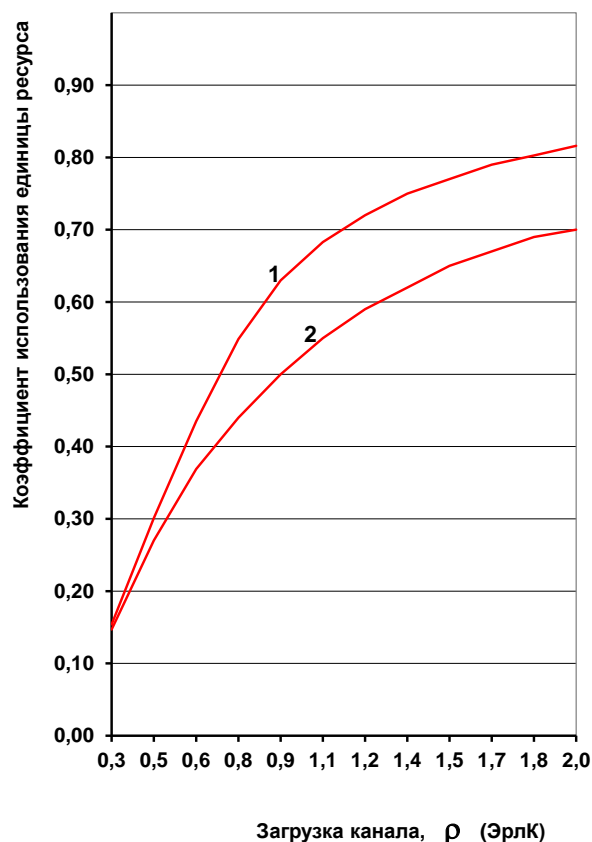


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента использования единицы ресурса общей линии (в нумерации рисунка 4.1) от увеличения интенсивности поступления заявок в каждом из потоков при использовании механизмов резервирования (кривая 2) и раздельного использования ресурса (кривая 1)

Выполненные численные исследования отдельных мультисервисных сетей показали, что разница в значениях коэффициента использования единицы ресурса может достигать 10% и выше. Точные оценки могут быть получены для конкретных топологий с помощью разработанных расчетных процедур.

4.3.6. Рекомендации по выбору расчетных процедур

Выбор конкретной расчетной процедуры между имитационным моделированием и применением метода просеивания поступающего потока заявок зависит от размеров сети, принятых допущений о характере распределения интервалов времени между поступлением заявок и времени их обслуживания. Если перечисленные допущения носят общий характер и ограничение по времени счета не столь существенно, то рекомендуется использовать имитационное моделирование. Если входные потоки можно считать пуассоновскими и время счета должно быть небольшим, то рекомендуется использовать метод просеивания поступающего потока заявок.

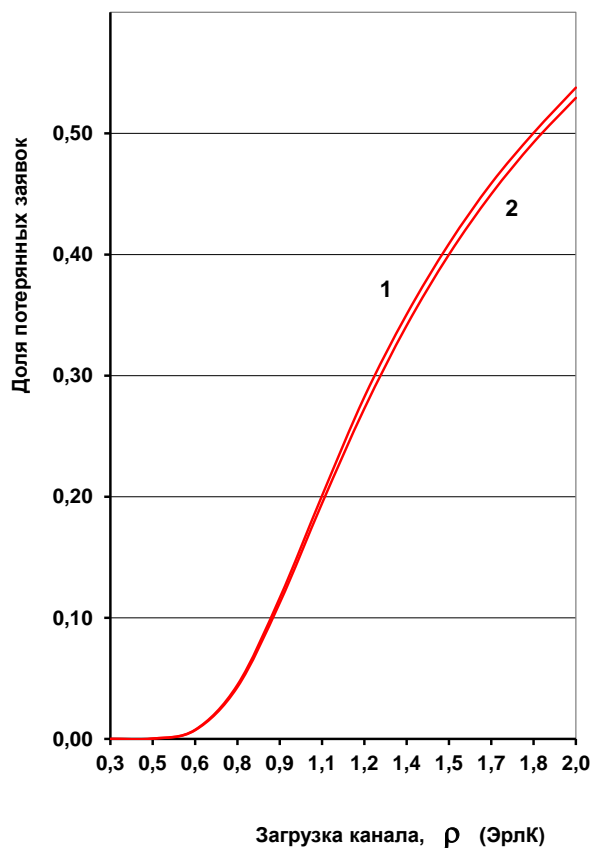


Рис. 4.10. Сравнение потерь заявок на передачу высокоскоростного трафика, найденные после реализации процедуры резервирования ресурса имитационным моделированием (кривая 1) и методом просеивания поступающего потока заявок (кривая 2)

Сравним погрешность реализации обоих подходов, взяв в качестве примера модель сети, рассмотренную при подготовке численных данных в разделе 3.3. Единственным отличием будет требование к ресурсу передачи для обслуживания высокоскоростного трафика, которое возьмем равным $b_9 = 10$ к.е.

На рисунке 4.10 показаны значения потерь заявок на передачу высокоскоростного трафика, найденные после реализации процедуры резервирования ресурса имитационным моделированием (кривая 1) и методом просеивания поступающего потока заявок (кривая 2). Приведенные данные показывают, что разница в значениях характеристик для данного примера действительно очень мала. Результаты численного исследования показывают, что она лежит в пределах 5–10 %.

4.3.7. Оценка скорости звеньев сети

Результаты, полученные в данном разделе, показали наиболее простые способы решения проблем, связанных с совместной передачей неоднородного трафика по общим линиям связи. Они заключаются в применении алгоритмов резервирования или отдельного использования общей среды передачи. После выбора одной из перечисленных процедур необходимо найти скорости звеньев сети, при которых доли потерь поступающих потоков заявок будут удовлетворять заданному критерию, например, максимальное значение потерь не будет превосходить заданного значения. Для решения этой задачи используется метод перебора, основные шаги которого рассмотрены в разделе 4.2. Приведем пример реализации этой процедуры, взяв в качестве сети конструкцию, показанную на рисунке 4.1. Напомним число канальных единиц в звеньях сети: $v_1 = 130$ к.е., $v_2 = 23$ к.е., $v_3 = 130$ к.е., $v_4 = 130$ к.е., $v_5 = 18$ к.е., $v_6 = 18$ к.е. Величину b_9 выберем из соотношения: $b_9 = 10$ к.е. В сети

анализируется процесс передачи 9 потоков трафика реального времени в соответствии с маршрутной матрицей, представленной в разделе 4.3.1. Будем предполагать, что выравнивание потерь заявок на передачу неоднородного трафика осуществляется с помощью процедуры резервирования, изложенной в разделе 2.3.3. Для оценки доли потерь заявок используется метод просеивания потока заявок, рассмотренный в разделе 3.3. Значения потерь заявок, полученные этим алгоритмом для перечисленных выше скоростей звеньев, определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \pi_{c,1} &= 0,125564; \pi_{c,2} = 0,194514; \pi_{c,3} = 0,194514; \pi_{c,4} = 0,376296; \\ \pi_{c,5} &= 0,295654; \pi_{c,6} = 0,436524; \pi_{c,7} = 0,225679; \pi_{c,8} = 0,200001; \\ \pi_{c,9} &= 0,194514. \end{aligned}$$

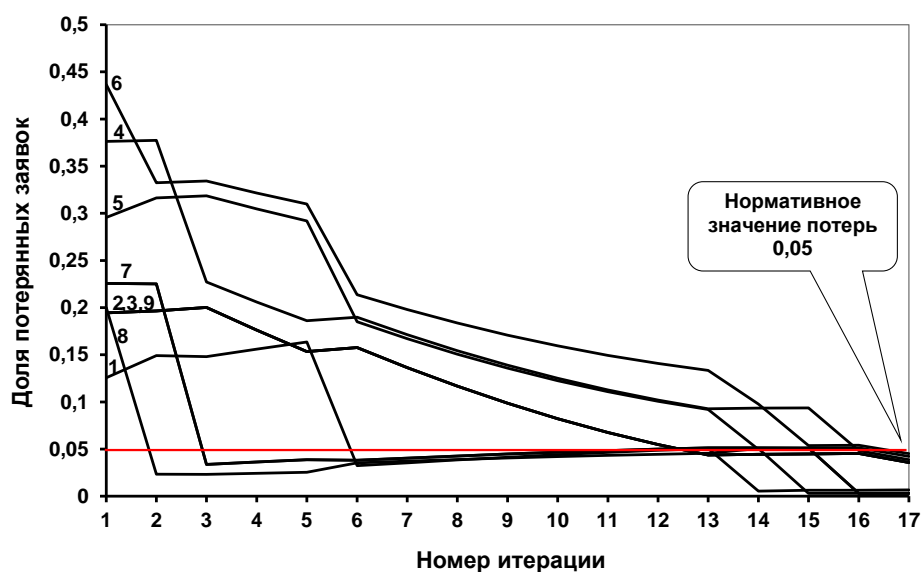


Рис. 4.11. Результаты промежуточного вычисления значений потерь заявок при реализации процедуры оценки скорости звеньев сети методом просеивания поступающего потока заявок. Номер кривой указывает на номер потока

Далее реализуется процедура увеличения скорости звеньев сети, рассмотренная в разделе 4.2.

Промежуточные результаты оценки достаточности ресурса звеньев сети показаны на рисунке 4.11, где приведены значения доли потерянных заявок $\pi_{c,k}$ $k=1,2,\dots,9$, в зависимости от номера шага итерационного цикла.

Чтобы уменьшить число итераций добавочный канальный ресурс был выбран равным 5. На данную величину увеличивалась скорость звена с максимальным уровнем потерь. Звено принадлежит маршруту с максимальным уровнем потерь заявок. В силу используемого выбора значений скоростей 1-го и 4-го звеньев, а также реализации процедуры резервирования, значения потерь заявок для 2,3 и 9 потоков совпадают. Значение нормативных потерь π принято равным 0,05. Требуемые значения потерь заявок будут получены на 17-ом шаге алгоритма и достигаются при следующем выборе скоростей звеньев сети: $v_1 = 130$ к.е., $v_2 = 33$ к.е., $v_3 = 180$ к.е., $v_4 = 130$ к.е., $v_5 = 28$ к.е., $v_6 = 28$ к.е. Величины потерь определяются из равенств

$$\pi_{c,1} = 0,006646; \pi_{c,2} = 0,035709; \pi_{c,3} = 0,035709; \pi_{c,4} = 0,038773;$$

$$\pi_{c,5} = 0,042118; \pi_{c,6} = 0,045071; \pi_{c,7} = 0,003177; \pi_{c,8} = 0,003083;$$

$$\pi_{c,9} = 0,035709.$$

Результаты имитационного моделирования этих же характеристик имеют вид:

$$\pi_{c,1} = 0,006379; \pi_{c,2} = 0,036203; \pi_{c,3} = 0,035749; \pi_{c,4} = 0,038547;$$

$$\pi_{c,5} = 0,041409; \pi_{c,6} = 0,044805; \pi_{c,7} = 0,003031; \pi_{c,8} = 0,002849;$$

$$\pi_{c,9} = 0,035805.$$

и показывают, что погрешность используемой процедуры приемлема для практических приложений.

4.4. Выводы

1. Для оценки скорости звеньев мультисервисной сети связи, в которой допускается наличие потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени от конечных групп пользователей и возможность применения процедур резервирования ресурса передачи информации для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика построен итерационный метод перебора. Сформулированы правила выбора начальных значений скорости передачи звеньев сети и их последовательного увеличения, основанные на применении характеристик потерь заявок на отдельных звеньях сети, полученных в результате реализации алгоритма просеивания поступающих заявок.

2. Проведено численное исследование характеристик совместного обслуживания неоднородного трафика, которое показали, что при разбросе требований к скорости передаче информации, превышающем 20–30 раз, может оказаться невыгодным с точки зрения эффективности загрузки единицы канального ресурса использование резервирования ресурса для выравнивания показателей качества обслуживания высокоскоростного трафика по сравнению с применением для этих же целей отдельного использования общего ресурса на передачу низкоскоростного и высокоскоростного трафика. Выполненные численные исследования отдельных мультисервисных сетей показали, что разница в значениях коэффициента использования единицы ресурса может достигнуть 10% и выше. Точные оценки могут быть получены для конкретных топологий с помощью разработанных в диссертации расчетных процедур.

3. Выбор конкретной расчетной процедуры для оценки скорости звеньев мультисервисной сети связи при передаче трафика сервисов реального времени между имитационным моделированием и применением метода просеивания поступающего потока заявок зависит от размеров сети, принятых допущений о характере распределения интервалов времени между

поступлением заявок и времени их обслуживания. Если перечисленные допущения носят общий характер и ограничение по времени счета не столь существенно, то рекомендуется использовать имитационное моделирование. Если входные потоки можно считать пуассоновскими и время счета должно быть небольшим, то рекомендуется использовать метод просеивания поступающего потока заявок.

Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Выполнен анализ особенностей построения и эксплуатации мультисервисных сетей связи. Исследование показало, что при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени наблюдается неконтролируемое оператором перераспределение канального ресурса в пользу потоков заявок с малыми потребностями в ресурсе передачи информации. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается применять либо резервирование, либо раздельное использование ресурса звеньев сети.

2. Для обоснования процедуры выбора конкретного сценария распределения ресурса сети разработана модель, состоящая из произвольного числа узлов и соединительных линий. Поступление заявок на передачу трафика реального времени следует либо пуассоновской модели (низкоскоростной трафик), либо модели Энгсета (высокоскоростной трафик). Вероятность допуска заявки к обслуживанию зависит как от величины свободного ресурса, так и от степени его загрузки. Разработанная модель может быть использована для оценки достаточности ресурса в звеньях сети при совместном обслуживании мультисервисного трафика реального времени.

3. В рамках построенной модели сформулированы определения для основных характеристик совместного обслуживания заявок на передачу трафика реального времени. В общем случае их значения оценивались с использованием имитационного моделирования или с помощью приближенного метода, основанного на процедуре просеивания поступающих заявок. Проведено численное исследование точности приближенного метода, которое на рассмотренных примерах показало, что погрешность оценки характеристик лежит в пределах 5-15 %.

4. Исследован частный случай модели с двумя потоками заявок, один из которых образован конечной группой пользователей (высокоскоростной трафик), другой – бесконечной (низкоскоростной трафик). Ресурс резервируется для преимущественного обслуживания высокоскоростного трафика. Для оценки характеристик рекомендуется использовать алгоритм, основанный на решении системы уравнений равновесия методом Гаусса-Зейделя.

5. Для оценки скорости звеньев анализируемой модели мультисервисной сети связи построен итерационный метод, основанный на процедуре перебора. Сформулированы правила выбора начальных значений скорости передачи звеньев сети и их последовательного увеличения, основанные на применении характеристик потерь заявок на отдельных звеньях сети, полученных в результате реализации алгоритма просеивания поступающих заявок.

6. Результаты численного исследования показали, что при совместном обслуживании неоднородного трафика и разбросе требований к скорости передачи, превышающем 20–30 раз, может оказаться невыгодным с точки зрения эффективности загрузки единицы ресурса использование резервирования для выравнивания показателей обслуживания трафика по сравнению с отдельным занятием ресурса. Разница в значениях коэффициента использования единицы ресурса может достигнуть 10% и выше. Точные оценки могут быть получены для конкретных топологий с помощью разработанных в диссертации расчетных процедур.

7. Результаты исследования рекомендуется использовать в научно-исследовательских и проектных организациях для решения задач оценки величины ресурса передачи информации мультисервисных линий при совместной передаче неоднородного трафика реального времени.

Список литературы

1. Архитектура MPLS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.osp.ru/text/302/144399/> (дата обращения 01.09.2016).
2. Бакланов И.Г. NGN: принципы построения и организации / под ред. Ю.Н.Чернышова. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
3. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. пособие. Изд. 2-е исправ. и доп. – М.: Изд-во РУДН, 2007. – 268 с.
4. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Анализ проскальзывания в плезиохронной сети // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №2. – С.19–24.
5. Богомолова Н.Е., Саламех Немер. Исследование влияния алгоритмов шифрования на самоподобие трафика в сетях стандарта WiMAX // Труды Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2010». –М.: Энергоатомизд, 2010. – Ч. 3. – С.139–141.
6. Богомолова Н.Е., Саламех Немер. Анализ параметров трафика сетей WiMAX при различных алгоритмах шифрования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Том 5. – № 7. – С.134–135.
7. Богомолова Н.Е., Саламех Немер. Повышение пропускной способности сети пакетной коммутации речи // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». – М.: РУДН. – 2011. – С.12–14.
8. Богомолова Н.Е., Саламех Немер. Разработка модели маршрутизации в сети с мультипротокольными метками // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». – М.: РУДН. – 2012. – С.24–26.

9. Богомолова Н.Е., Саламех Немер. Исследование алгоритмов маршрутизации разноскоростных соединений в сетях MPLS // Труды Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2014». – М.: 2014. – Ч. 5. – С. 86–89.
10. Буассо М., Деманж М., Мюнье Ж. Введение в технологию ATM : Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1997. – 128 с.
11. Введение в MPLS, TE и QoS. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://citforum.ru/nets/semenov/4/4/mpls17.shtml> (дата обращения 15.09.2016).
12. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
13. Гайдамака Ю.В., Масленников А.Г. Об одной системе массового обслуживания с активным управлением очередью // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2013. — №4. — С. 56–64.
14. Голубничая Е.Ю., Лихтциндер Б.Я. Временное планирование в кластерных беспроводных сенсорных сетях ZIGBEE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – № 1. – С.5–10.
15. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. – СПб: "БХВ-Петербург", 2005. – 304 с.
16. Гольдштейн Б.С., Пинчук А.В., Суховицкий А.Л. IP-Телефония. – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
17. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи: Учебник для ВУЗов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
18. Дибби В.Н. Модели и методы расчета мультисервисных контакт-центров: Дис... канд. техн. наук :05.12.13 – Санкт Петербург, 2011. – 125 с.
19. До Суан Тху. Модели и алгоритмы оценки пропускной способности линий концентрации мультисервисного трафика : Дис... канд. техн. наук: 05.12.13 – Москва, 2012. – 142 с.

20. Ершов В.А, Кузнецов Н.А. Мультисервисные телекоммуникационные сети. – М.:изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2003. – 432 с.
21. Казанский Н.А, Ермакова Н.А, Сычев М.Б. Методы технической диагностики устройств связи. М. : МИИТ, 2008 . – 48с.
22. Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А. Методы ТВ вещания в стандарте DVB-T2 со вставкой регионального контента // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №4. – С.41–46.
23. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: Пер. с англ. под ред. В. И. Неймана. – М.: Машиностроение, 1979. – 452 с.
24. Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.
25. Крылов В.В., Самохвалов С.С. Теория телетрафика и её приложения. – СПб.:БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
26. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.:Наука и техника, 2004. – 336 с.
27. Кучерявый А.Е., Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. – М.:ФГУП ЦНИИС, 2006. – 280 с.
28. Лагутин В. С., Степанов С. Н. Телетрафик мультисервисных сетей связи. – М. : Радио и связь, 2000. – 320 с.
29. Лазарев В.Г. Интеллектуальные цифровые сети: Справочник. М. : Финансы и статистика, 1996. – 224 с.
30. Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. – М.: Радио и связь, 1985.– 184 с.
31. Марк Лассерре. Межсоединение локальных сетей посредством MPLS // Журнал Сетевых решений/LAN . –2004. – №8. – С.66–69.
32. Масленников А.Г., Экспериментальное исследование метода обработки трафика в очереди Linux-маршрутизатора на основе нечеткой логики // Т-Comm. Телекоммуникации и Транспорт — 2016. — №1. — С. 19–23.

33. Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.niits.ru/themes/?mpls> (дата обращения 09.03.2015).
34. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчёта показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – 2-е изд., перераб и доп. – Красноярск: Изд-во ООО "Поликом", 2011. – 491 с.
35. Назаров А.Н., Симонов Н.В. АТМ технология высокоскоростных сетей. – М.: ЭКО–ТРЕНД, 1998. – 302 с.
36. Назаров А.Н. Модели и методы расчёта структурно-сетевых параметров АТМ сетей. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 256 с.
37. Наумов В.А., Самуйлов К.Е., Яркина Н.В. Теория телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Изд-во РУДН, 2007. – 191с.
38. Нейман В.И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Электросвязь. – 1999. – № 1. – С.11–14.
39. Оливейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS. –М.: Вильямс, 2004. – 480 с.
40. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы – СПб.: Питер, 2001. – 957 с.
41. Орлова Е.Ю., Орлов А.А. Оптоволоконные технологии и сферы их применения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №3. – С.63–66.
42. Рабочая группа IETF MPLS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ietf.org/html.charters/mpls-charter.html> (дата обращения 18.05.2015).
43. Росляков А.В. Виртуальные частные сети основы построения и применения. М.: Эко–Трендз, 2006. – 304 с.
44. Саламех Немер. Разработка алгоритма оценки пропускной способности

- звеньев мультисервисной сети связи при обслуживании трафика сервисов реального времени // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». – М.: МТУСИ. –2015. – С. 58.
45. Саламех Немер. Влияние стандартных алгоритмов шифрования на процесс сглаживания трафика в сетях WiMAX // Труды международной конференции, посвященной дню Радио. – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2011. – С.288 –299.
46. Саламех Немер. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети с мультипротокольными метками // Труды международной конференции, посвященной дню Радио. – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2012. – С.212 –214.
47. Саламех Немер. Метод выравнивания нагрузки разноприоритетного трафика в сетях MPLS // Труды международной конференции, посвященной дню Радио. – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2013. – С.36 –38.
48. Саламех Немер. Задача оптимального распределения нагрузки при маршрутизации в сетях MPLS // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». – М.: РУДН. – 2013. – С.36–38.
49. Саламех Немер. Задача оптимизации IP –трафика в MPLS-сети // Труды международной молодежной научно-практической конференции СКФ МТУСИ «ИНФОКОМ-2013». –2013. – С.214– 217.
50. Саламех Немер. Процесс динамической маршрутизации разноприоритетного MPLS-сети // Т-Сомм: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. –Том 7. – № 7. – С.109– 111.
51. Соколов Н.А. Телекоммуникационные сети. Монография в 4-х главах. Глава 1. 2003 – 128 с. Глава 2. 2003 – 128 с. Глава 3. 2004 – 192 с. Глава 4.

- 2004 – 192 с. – М.: Альварес Паблишинг.
52. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Эко – Трендз. – 2010. – 392 с.
 53. Степанов С. Н. Модель обслуживания трафика сервисов реального времени и данных с динамически изменяемой скоростью передачи. I // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 1. – С. 18– 33.
 54. Степанов С. Н. Модель совместного обслуживания трафика сервисов реального времени и данных. II // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 4. – С. 121– 132.
 55. Степанов С.Н., Саламех Немер. Анализ методов оценки скорости звеньев мультисервисной сети связи при обслуживании трафика сервисов реального времени // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». – М.: МТУСИ. 2015. – С. 40–41.
 56. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 868 с: ил. – (Серия «Теория и практика инфокоммуникаций»).
 57. Степанов С.Н., Саламех Немер. Построение и анализ обобщенной модели передачи мультисервисного трафика реального времени в сетях связи // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2016. Том 8. – № 4. – С. 37–44.
 58. Степанов С.Н., Саламех Немер. Построение и анализ двухпоточковой модели звена с конечным числом абонентов и возможностью внутренних блокировок// Т-Сомм: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. –Том 10. – № 9. – С. 30–37.
 59. Таблицы маршрутизации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://citforum.ru/nets/semenov/4/4/mpls18.shtml> (дата обращения 22.09.2013)
 60. Тимошина М. М. Разработка и исследование метода повышения скорости

- передачи данных в мультисервисных сетях на основе стека протоколов TCP/IP: Дис... канд. техн. Наук: 05.12.13 – Самара, 2013. – 133 с.
61. Цитович И. И., Чернушевич А. В. Расчет стационарных вероятностей трехпоточковой модели управления доступом к ресурсам БШС с гистерезисами // Информационные процессы. – 2011. – Том 11. – № 2. – С. 262–276.
 62. Широков, В. Л. Разработка моделей и методов для оценки и выбора параметров мультисервисных систем обмена информацией : Дис... канд. техн. наук : 05.12.13 – Москва, 2006. – 162 с.
 63. Шнепс-Шнеппе М.А. Лекции по NGN. – М.: Макс Пресс, 2005. – 232 с.
 64. Щека, А. Ю. Исследование и разработка метода расчета качества обслуживания пользователей при доступе к мультисервисным сетям: Дис... канд. техн. наук: 05.12.13 – Москва, 2003. – С.169.
 65. Яновский Г.Г. Качество обслуживания в сетях IP // Вестник связи. – 2008. – № 1. – С. 65– 74.
 66. Addie R. G., Zukerman M., Neame T. D. Broadband Traffic Modeling: Simple Solutions to Hard Problems // IEEE Communications Magazine, August 1998. – P. 88– 95.
 67. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications // Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. – 1993. – 864 p.
 68. Akimaru H., Kawashima K. Teletraffic, Theory and Applications, Springer-Verlag. – 1999. – 174 p.
 69. Alidadi A., Mahdavi M., Hashmi M. R. A New Low-Complexity QoS Routing Algorithm for MPLS Traffic Engineering // Proceedings of the 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications 15–17 December 2009 Kuala Lumpur Malaysia.
 70. Awduche D., Malcolm J., Agogbua J., O’Dell M., McManus J. Requirements for traffic engineering over MPLS // RFC 2702, September 1999.

71. Behringer M.H., Morrow M. J. MPLS VPN Security Cisco Press, 2005. –P.312.
72. Bessler S. Label switched paths re-configuration under time-varying traffic conditions // Proceedings of the 15th ITC Specialist Seminar, pages 33-38, Wurzburg, Germany, 2002.
73. Bonald T., Proutiere A. Insensitive bandwidth sharing in data networks // Queueing Systems. – 2003. – V. 44. – N. 1. – P. 69– 100.
74. Bonald T. Insensitive traffic models for communication networks // Discrete Event Dynamic Systems. – 2007. – V. 17. – N. 3. – P. 405– 421.
75. Bonald T. The Erlang model with non-Poisson call arrivals // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. – 2006 . – V. 34. – N. 1. – P. 276–186.
76. Bonald T., Roberts J. Internet and the Erlang formula // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2012. – V. 42. – N. 1. – P. 22–30.
77. Courcoubetis C., Weber R. Pricing Communication Networks: Economics, Technology and Modelling. – Chichester, Wiley, 2003. –357 p.
78. D'Andreti P., Tortorella F. A Machine Learning Based Algorithm for Routing Bandwidth-Guaranteed Paths in MPLS TE: Improvements and Performance Assessment. Universita degli Studi di Cassino. Cassino (FR), Italy, 2011.
79. Davies G., Hardt M., Kelly F. Come the Revolution - Network Dimensioning, Service Costing and Pricing in a Packet Switched Environment // Telecommunications Policy. – 2004. – N. 28. – P. 391–412.
80. Elwalid. A., Jin. C., Low. S. H., Widjaja. I. MATE: MPLS adaptive traffic engineering // In Proceedings IEEE INFOCOM 2001, pages 1300– 1309, Anchorage, Alaska, April 2001.
81. Erbas S.C., Erbas C. A multiobjective offline routing model for MPLS networks. In J. Charzinski, R. Lehnert, and P. Tran-Gia, editors, Providing Quality of Service in Heterogenous Environments // Proc. Of the 18th International Teletraffic Congress (ITC–18), pages 471–480, Berlin, Germany,

August-September 2003.

82. Erbas S.C., Mathar R. An offline traffic engineering model for MPLS networks // In Proceedings of the 27th Conference on Local Computer Networks LSN 2002, pages 166–174, Tampa, Florida, November 2002. IEEE Computer Society.
83. Francisco C., Martins L., Redol J., Monteiro P. A previous study on Dynamic Alternative Routing with local protection paths in MPLS networks // INESC-Coimbra, Tech. Rep. ISSN:1645–2631, May 2010. – 641 p.
84. Francisco C., Martins L., Redol J., Monteiro P. Dynamic Alternative Routing with Local Protection Paths in MPLS networks // Proc. of the 2010 International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT).Portugal ,2010.
85. Frost V. S., Melamed B. Traffic Models for Telecommunications Networks // IEEE Communications Magazine, March 1994. – P. 70–81.
86. Hamid N., Shahhoseini H.S., Jafari A.H. Availability–Based Routing Algorithm Using AHP Method in IP/MPLS Networks // Proc. of the International Conference on Computer Science and Service System,. Iran, Tehran, 2012.
87. Hodzic H., Secerbegovic E. Online constraint-based routing as support for MPLS Traffic Engineering // Proc. of the 51st International Symposium ELMAR–2009, 28–30 September 2009, Zadar, Croatia.
88. Hui J.Y. Resource allocation for broadband networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1988. – V.6. – P.1598–1608.
89. ITU-T Recommendations. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC/e> (дата обращения 08.02.2010).
90. Iversen V.B. Teletraffic Engineering and Network Planning – Technical University of Denmark, May 2010. – 370 p.
91. Jagerman D. L., Melamed B., Willinger W. Stochastic modeling of traffic

- processes, In J. Dshalalow, ed., *Frontiers in Queueing: Models, Methods and Problems*. CRC Press, 1997. – P. 271–320.
92. Jialei Wu., Yuanping Zhang. *A Layered MPLS Network Architecture* // School of Computer and Communication Lanzhou University of Technology Lanzhou, P.R.China 2010.
 93. Kelly F.P. Notes on effective bandwidths. In: F.Kelly, S.Zachary and I.Ziedinis (Eds.), *Stochastic Networks: Theory and Applications Telecommunications Networks* // Volume 4 of Royal Statistical Society Lecture Notes Series, Oxford, P.141– 168. Oxford University Press.
 94. Kelly F.P. *Reversibility and stochastic networks* – New York: Wiley, 1979. – 238 p.
 95. Knowles J., Oates M., Corne D. Advanced multi-objective evolutionary algorithms applied to two problems in telecommunications // *BT Technology Journal*, 2000. –V.18. –N4 – P. 51–65.
 96. Kodialam M., Lakshman T. Dynamic Routing of Locally Restorable Bandwidth Guaranteed Tunnels Using Aggregated Link Usage Information // In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2001. – P.376–385.
 97. Lindberger K. Dimensioning and design methods for integrated ATM networks // *Proc. of the 14th International Teletraffic Congress*. Antibes Juan-les-Pins, 1994. – P.17.
 98. Ma Q., Steenkiste P. On path selection for traffic with bandwidth guarantees // In *Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols*, Atlanta, GA, October 1997.
 99. Massoulié L., Roberts J.W. Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic // *Telecommunication Systems*. – 2000. – V. 15– P. 185–201.
 100. Mitra D., Ramakrishnan K. G. A case study of multiservice, multipriority traffic engineering design for data networks // In *Proceedings IEEE GLOBECOM 99*, volume 1B, pages 1077– 1083, Brazil, December 1999.

101. Molnar S. Traffic models and teletraffic dimensioning. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hsnlab.tmit.bme.hu/~molnar/files/models.pdf> (дата обращения 02.03.2011).
102. Moy J. OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol, New York: Addison–Wesley, 1998. – 339 p.
103. Nai-Bin Hsu. The Routing of Healthcare Applications in MPLS Networks // Proc. of the 2010 Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. Hsinchu, Taiwan, 2010.
104. Odlyzko A. The history of communications and its applications for the Internet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.research.att.com/~amo/doc/complete.html> (дата обращения 07.12.2010).
105. Padhye J. Modeling TCP Throughput: A Simple Model and Its Empirical validation // Proc. SIGCOMM'88, ACM, 1998. – 12 p.
106. Park K., Willinger W. Self– Similar Network Traffic: An Overview, Self– Similar Network // Traffic and Performance Evaluation (ed), Wiley– Interscience. – 2000. – 574 p.
107. Roberts J. Traffic Theory and the Internet // IEEE Communications Magazine, January 2001. –V.39. –P.94–99.
108. Roberts J. Engineering for Quality of Service. In the book "Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation" K. Park, W. Willinger, Wiley, (eds.)2000.
109. Roberts J., Mocchi U., Virtamo J. (eds.), Broadband network teletraffic, Springer– Verlag, 1996.
110. Ross K.W. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks. – London, Berlin, New-York: Springer– Verlag, 1995. – 343 p.
111. Rong Ren., Deng-Guo Feng ., Ke Ma. A detailed implement and analysis of MPLS VPN based on IPSec // Proceedings of the Third International

- Conference on Machine Learning and Cybernetics. – Shanghai, 26–29 August 2004. – P. 2779–2783.
112. Schnitter S., Halinger G. Heuristic solutions to the LSP-design for MPLS traffic engineering // Proceedings of the 10th International Telecommunication Network Strategy and Planning Symposium (Networks 2002), Munich, Germany, June 2002.
113. Stamatelos G. M., Koukoulidis V. N. Reservation-based bandwidth allocation in a radio ATM network // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 1997. – V. 5. – N. 3. – P. 420–428.
114. Stamoulis G. D., Anagnostou M. E., Georganas A. D. Traffic sources models for ATM networks: a survey // Computer Communications. – 1994. – V. 17. – N. 6. – P. 428–438.
115. Suri S., Waldvogel M., Warkhede P.R. Profile-based routing: A new framework for MPLS traffic engineering // In M. I. Smirnov, J. Crowcroft, J. R., and F. Boavida, (eds.), "Quality of Future Internet Services" // Proceeding of QofIS 2001, volume 2156 of Lecture Notes in Computer Science. – P. 138–157.
116. Szeto W., Boutaba R., Iraqi Y. Dynamic Online Routing Algorithm for MPLS Traffic Engineering // Department of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 2002. – V. 10. – N. 3. – P. 309–305.
117. Tsitovich I. I., Tsitovich F. I. Sub-Optimal Nonparametric Hypotheses Discriminating with Guaranteed Decision // International Journal "Information Models and Analyses", 2013. – V. 2. – N. 1. – P. 62–69.
118. Virtamo J. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s383141/english.shtml>. (дата обращения 24.19.2012).
119. Walrand J., Varaiya P. High // Performance Communications Networks (2nd ed). – Morgan Kaufmann, 2000.

120. Whittle P. Partial balance and insensitivity // Journal of Applied Probability. – 1985. – V. 22. – P. 168–176.

Приложение. Акты о реализации результатов диссертационной Работы

1. Акт об использовании результатов диссертационной работы Саламех Немера на тему: «Анализ и разработка метода оценки скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени» в процессе развития и модернизации сети связи города Дамаска Сирийской Арабской Республики (SYRIAN TELECOM).
2. Акт об использовании результатов диссертационной работы Саламеха Немера на тему: «Анализ и разработка метода оценки скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени» в учебном процессе кафедры «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ.

Act

عن استخدام نتائج بحث رسالة الدكتوراه المقدمة من الباحث نمر سلامة عن الاطروحة (تحليل و تطوير أساليب تقييم سرعة الروابط في الشبكات متعددة الخدمات عند تخديم حركة مرور مشتركة للنطاق الضيق و النطاق الواسع في الوقت الحقيقي) عند تحديث و تطوير شبكة الاتصالات في مدينة دمشق بالجمهورية العربية السورية.

نتائج بحث رسالة الدكتوراه المقدمة من الباحث نمر سلامة و بالتحديد:

توصيات بشأن خدمة مرور مشتركة للنطاق الواسع و الضيق، مستنتجة على أساس تحليل مشاريع تخديم الشبكات متعددة الخدمات في شبكات الاتصالات الحالية و المتطورة لاحقاً (النتائج منشورة بالمجلة العلمية الروسية T-Comm و موجودة على موقع <http://www.media-publisher.ru>) تستخدم عند القيام بأنشطة لتحسين الأداء و تصميم شبكة الاتصالات في مدينة دمشق.

عند تطوير و تحديث شبكة الاتصالات في مدينة دمشق سيتم الاخذ بعين الاعتبار الانتقال من تقنية (Circuit switching) إلى استخدام تقنية (Packet switching) لمواكبة الشبكات الحديثة (New Generation Networks, NGN)

علي محمد رفاعي

رئيس قسم الشبكات



بكر بكر

المدير العام



Акт

об использовании результатов диссертационной работы Саламех Немера на тему: «Анализ и разработка метода оценки скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени» в процессе развития и модернизации сети связи города Дамаска Сирийской Арабской Республики

Результаты диссертационной работы Саламеха Немера, а именно рекомендации по условиям совместного обслуживания неоднородного трафика, полученные на основе анализа процессов обслуживания мультисервисного трафика в действующих и перспективных сетях связи (результаты опубликованы в Российском журнале T-Comm и представлены на сайте <http://www.media-publisher.ru>) использованы при проведении мероприятий по повышению эффективности работы и проектированию сети связи города Дамаска.

При проектировании сети связи в городе Дамаск учитывается необходимость модернизации сети, построенной на базе технологии коммутации каналов, к сети коммутации пакетов в соответствии с концепцией NGN.

Начальник отдел (сети связи)

Мухамед Рифаи

Генеральный Директор

Бакр Бакр

Перевод выполнил переводчик

Горбаткова Кристина Георгиевна



Город Москва
Двадцать второго апреля две тысячи шестнадцатого года.

Я, Галкова Елена Николаевна, временно исполняющая обязанности нотариуса города Москвы Сидорова Кирилла Евгеньевича, свидетельствую подлинность подписи, сделанной переводчиком *Горбатковой Кристиной Георгиевной* в моём присутствии. Личность ее установлена.

Зарегистрировано в реестре за № 9-12698
Взыскано по тарифу: 100 рублей

Врио нотариуса



Ja Е. Н. Галкова



Прошнуровано, пронумеровано
и скреплено печатью 2 лист (а, -ов)

Врио нотариуса

Ja

Посольство Сирийской Арабской Республики		
Консульский Отдел		
удостоверяет подлинность предстоящей подписи		
Москва	« <u>17</u> » <u>05</u>	2016 г.
№ <u>227</u>	Консул _____	



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по учебной работе ордена
Трудового Красного Знамени федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский технический
университет связи и информатики»

к.т.н., доцент

Е.В. Титов



2016 г.

Акт

об использовании результатов диссертационной работы Саламеха Немера на тему: «Анализ и разработка метода оценки скорости звеньев мультисервисной сети при совместном обслуживании неоднородного трафика реального времени» в учебном процессе кафедры «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ

Комиссия в составе: начальника Центра планирования и сопровождения учебного процесса Патенченковой Е.К.; и.о. декана факультета «Сети и системы связи», д.т.н., профессора Шаврина С.С.; профессора кафедры «Сети связи и системы коммутации», к.т.н., профессора Пшеничникова А.П. удостоверяет, что результаты диссертационного исследования Саламеха Немера, а именно, обобщенная модель мультисервисной сети связи, учитывающая особенности поступления и обслуживания мультисервисного трафика современных коммуникационных приложений реального времени используется при проведении лабораторных работ по дисциплине: «Спецглавы теории массового обслуживания», который читается для магистрантов факультета «Сети и системы связи» первого года подготовки.

Начальник Центра планирования
и сопровождения учебного процесса

Патенченкова Е.К.

И.о. декана факультета «Сети и системы
связи», д.т.н., профессор

Шаврин С.С.

Профессор кафедры «Сети связи
и системы коммутации», к.т.н., проф.

Пшеничников А.П.