

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

---

На правах рукописи

**ОСИЯ ДМИТРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

**Разработка модели и алгоритмов оценки  
пропускной способности иерархических  
сетей доступа в условиях перегрузки**

Специальность 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Степанов Сергей Николаевич

Москва — 2017 г.

## Аннотация

Диссертация посвящена разработке моделей и алгоритмов оценки пропускной способности звеньев мультисервисной иерархической сети доступа в условиях перегрузки. Для решения сформулированной задачи процессы поступления и обслуживания заявок представлены математической моделью, которая описывается многомерным марковским процессом. При разработке модели учитывается общий вид топологии иерархической сети доступа; многопоточный характер поступления заявок на передачу трафика сервисов реального времени; зависимость поступления заявок от реакции абонента на отказ в установлении соединения; зависимость требуемого ресурса и среднего времени обслуживания заявки от номера потока.

Сформулированы определения для основных характеристик качества совместного обслуживания заявок. Установлены соотношения между характеристиками, которые упрощают оценку тех характеристик, прямое измерение которых встречает затруднения из-за невозможности разделения первичных и повторных вызовов. В общем случае значения характеристик рассчитывались с использованием имитационного моделирования или с помощью приближенного метода, основанного на асимптотических свойствах модели при малой и большой интенсивности повторения заявки. Разработана процедура оценки скорости звеньев мультисервисной иерархической сети доступа, в которой допускается наличие потоков повторных вызовов. Проведено численное исследование зависимости характеристик от параметров модели поведения абонента после отказа в обслуживании.

Построенная модель и разработанные на ее основе расчетные алгоритмы использованы в компании РУП «Абхазсвязь» Республики Абхазии в виде методики оценки потребности в канальном ресурсе мультисервисных иерархических сетей доступа, а также использованы в учебном процессе на кафедре СС и СК МТУСИ.

## Оглавление

Аннотация .....	2
Введение.....	6
Раздел 1. Мультисервисные сети доступа .....	11
1.1. Введение.....	11
1.2. Сети доступа и перспективы их развития .....	12
1.2.1. Эволюция сетей доступа .....	12
1.2.2. Особенности построения сетей доступа.....	14
1.3. Услуги перспективных систем связи .....	17
1.3.1. Эволюция сервисов.....	17
1.3.2. Классификация сервисов.....	20
1.3.3. Характеристики обслуживания сервисов реального времени .....	22
1.4. Контроль доступа .....	22
1.4.1. Введение.....	22
1.4.2. Параметры и характеристики процедур доступа.....	24
1.4.3. Сценарии реализации процедур доступа.....	25
1.4.4. Доступ на основе Intserv/RSVP.....	27
1.4.5. Применение процедур контроля доступа .....	28
1.5. Механизмы поддержки QoS.....	30
1.6. Планирование сетей доступа .....	34
1.6.1. Методология планирования .....	34
1.6.2. Последовательность решения задач планирования.....	36
1.7. Перегрузка в сетях доступа.....	39
1.8. Обзор выполненных исследований .....	43
1.8.1. Анализ сетей доступа .....	43
1.8.2. Анализ моделей с учетом эффекта повторных вызовов .....	45
1.9. Выводы и постановка задачи исследования.....	46

Раздел 2. Построение и анализ мультисервисной иерархической_сети доступа с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании.....	48
2.1. Введение.....	48
2.2. Математическое описание модели иерархической сети доступа .....	49
2.2.1. Структура и основные свойства иерархической сети доступа .....	49
2.2.2. Модель поведения абонента после получения отказа в обслуживании....	54
2.2.3. Модель поступления и обслуживания вызовов .....	56
2.2.4. Маршрутная матрица.....	59
2.2.5. Марковский процесс .....	62
2.2.6. Система уравнений равновесия.....	63
2.2.7. Характеристики качества обслуживания заявок .....	65
2.3. Свойства характеристик качества обслуживания заявок.....	67
2.3.1. Законы сохранения.....	67
2.3.2. Соотношения между характеристиками.....	68
2.4. Частные случаи.....	70
2.5. Имитационная модель .....	72
2.6. Численный анализ характеристик модели.....	74
2.7. Выводы.....	80
Раздел 3. Алгоритмы оценки характеристик мультисервисной иерархической сети доступа с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании .....	82
3.1. Введение.....	82
3.2. Оценка характеристик иерархической сети .....	83
3.2.1. Математическое описание модели.....	83
3.2.2. Основные показатели качества обслуживания заявок .....	84
3.2.3. Свойство мультипликативности.....	85
3.2.4. Звено иерархической сети.....	87
3.2.5. Алгоритм расчета характеристик иерархической сети .....	89
3.3. Оценка характеристик звена иерархической сети с повторением заблокированной заявки .....	91
3.3.1. Математическое описание модели.....	91
3.3.2. Характеристики качества обслуживания заявок .....	93

3.3.3. Алгоритм расчета характеристик .....	96
3.4. Численный анализ характеристик модели.....	100
3.5. Выводы .....	109
Раздел 4. Оценка скорости звеньев мультисервисной иерархической сети с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании.....	112
4.1. Введение.....	112
4.2. Оценка характеристик иерархической сети для больших значений интенсивности повторения вызова.....	113
4.2.1. Предпосылки .....	113
4.2.2. Расчетные выражения для характеристик.....	114
4.2.3. Погрешность оценки характеристик.....	116
4.3. Оценка характеристик иерархической сети для малых значений интенсивности повторения вызова.....	119
4.3.1. Предпосылки .....	119
4.3.2. Расчетные выражения для характеристик.....	121
4.3.3. Неявные уравнения и их решение.....	122
4.3.4. Погрешность оценки характеристик.....	123
4.4. Оценка скорости звеньев иерархической сети.....	127
4.4.1. Предпосылки .....	127
4.4.2. Метод просеивания заявок.....	128
4.4.3. Алгоритм оценки скорости звеньев .....	130
4.5. Выводы .....	136
Заключение .....	138
Список литературы .....	140
Приложение .....	155

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Определение необходимой величины ресурса передачи информации сетей связи осуществляется исходя из оценки интенсивности предложенного трафика и значений нормативных показателей качества его обслуживания. Случайный характер трафика и его зависимость от реакции пользователя на разного рода события, связанные с его формированием и обслуживанием, могут привести к возникновению перегрузки. Соответствующее явление означает такое состояние сети, при котором вследствие чрезмерной нагрузки оборудования коммутации и передачи информации происходит резкое ухудшение характеристик качества обслуживания абонентов. К основным причинам перегрузки следует отнести: ошибки планирования, выход из строя оборудования, чрезвычайные ситуации, DDOS атаки и т.п.

Эффектом, сопутствующим перегрузке в сетях связи, являются повторные запросы абонентов сети на получение требуемого сервиса. По понятным причинам особенно сильно их влияние проявляется в тех сегментах сети, которые наиболее приближены к абонентам, т.е. в сетях доступа. Повторные вызовы приводят к лавинообразному росту трафика в отдельных направлениях. Повторными вызовами можно объяснить резкий, до нескольких десятков раз, рост трафика в результате синхронизированных во времени обращений абонентов сети к услугам связи при осуществлении разного рода резонансных событий.

Теоретическое обоснование мероприятий, направленных на устранение перегрузки, а к ним относится ограничение доступа и увеличение пропускной способности сети, необходимо проводить в рамках моделей с учетом эффекта повторения заблокированной заявки. Использование традиционных моделей с потерями может привести к значительным погрешностям, поскольку эти модели не учитывают характер поведения абонента после отказа в обслуживании.

Таким образом, построение модели сети доступа, в которой учитываются перечисленные выше особенности их работы, проведение ее исследования и разработка алгоритмов расчета характеристик являются актуальными задачами,

имеющими большое значение для теоретического обоснования мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования инфраструктуры сетей доступа.

**Степень разработанности темы.** Поставленная задача решается на базе моделей и методов теории телетрафика. Различным аспектам решения этой задачи посвящены работы российских и зарубежных авторов Башарина Г.П., Гольдштейна Б.С., Ефимушкина В.А., Кучерявого А.Е., Корнышева Ю.Н., Пшеничникова А.П., Рослякова А.В., Степанова С.Н., Самуйлова К.Е., Соколова Н.А., Цитовича И.И., Шнепса М.А., Artalejo J., Iversen V., Ross K., Virtamo J. и др. Отдельные вопросы построения и исследования моделей сетей доступа рассматривались в диссертационных исследованиях Гавлиевского С.А., Щека А.Ю., До Суан Тху и др. авторов. 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 иерархических мультисервисных сетей доступа, одновременно учитывающих зависимость поступления заявок от типа трафика и наличие возможности повторения заблокированного вызова.

**Целью диссертационного исследования** является построение модели и алгоритмов оценки скорости соединительных линий иерархических сетей доступа, работающих в условиях перегрузки.

**Задачи диссертационного исследования,** решаемые для достижения указанной цели: построение и анализ модели мультисервисной иерархической сети доступа с учетом зависимости поступления заявок от потребности в ресурсе передачи и возможности повторения заблокированной заявки; определение характеристик пропускной способности анализируемой модели и разработка точных и приближенных алгоритмов их оценки; разработка методики оценки скорости линий сети, достаточной для обслуживания поступающих заявок с заданным качеством.

### **Научная новизна.**

1. Построена и исследована математическая модель процесса совместной передачи мультисервисного трафика реального времени в иерархических сетях доступа. В модели учитывается зависимость поступления заявок от потребности в ресурсе передачи и возможность повторения заблокированной заявки из-за отказа в обслуживании.

2. Сформулированы определения для основных показателей качества совместного обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Среди них для каждого из рассмотренных видов трафика: доля потерянных заявок, среднее число повторных вызовов на один первичный, среднее число абонентов, повторяющих вызов; средний объём занятого ресурса передачи информации. Величины характеристик выражены через значения стационарных вероятностей пребывания модели в состояниях с различным числом заявок каждого из рассмотренных видов, находящихся на обслуживании или повторении запроса. Установлены соотношения между характеристиками, которые упрощают процесс анализа тех характеристик, прямое измерение которых встречает затруднения из-за невозможности разделения первичных и повторных вызовов.

3. Построены и исследованы алгоритмы оценки характеристик анализируемой модели иерархической сети доступа. В общем случае, значения характеристик оценивались с использованием имитационного моделирования или с помощью приближенных алгоритмов, основанных на асимптотических свойствах модели при малой и большой интенсивности повторения заявки. Выполнен численный анализ погрешности приближенных алгоритмов.

4. Исследован частный случай модели иерархической сети из одного звена. Построен алгоритм оценки характеристик качества совместного обслуживания заявок, основанный на составлении и решении системы уравнений равновесия итерационными методами.

5. Разработан алгоритм оценки скорости звеньев мультисервисной иерархической сети доступа, в которой допускается наличие потоков повторных



вызовов. Приведены численные примеры, иллюстрирующие особенности реализации алгоритма.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в построении и исследовании модели мультисервисной иерархической сети доступа, в которой учтены зависимости поступления и обслуживания заявок от потребности в ресурсе передачи и возможности повторения заблокированной заявки. 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 иерархических сетей связи. Методы оценки пропускной способности сети доступа, разработанные соискателем, были использованы в компании РУП «Абхазсвязь» Республики Абхазии в виде методики оценки потребности в ресурсе передачи информации мультисервисных иерархических сетей доступа, а также использованы в учебном процессе на кафедре СС и СК МТУСИ. Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами, которые приведены в приложении.

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

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Анализ опыта функционирования сетей связи показал необходимость учета влияния поведения абонента на характеристики работы сети в условиях локальных перегрузок, вызванных выходом из строя оборудования, ошибками планирования, стихийными бедствиями и т.д. Особенно важно учитывать это явление в сетях доступа, которые в отличие от ядра сети не планируются с избытком пропускной способности.

2. Построенная модель мультисервисной иерархической сети доступа адекватно отражает особенности формирования трафика сервисов реального времени и дает возможность учесть влияние потоков повторных вызовов.

3. Разработанные точные и приближенные алгоритмы позволяют находить значения характеристик поступления и обслуживания информационных потоков в

сетях доступа и использовать полученные результаты для анализа свойств совместного обслуживания трафика современных инфокоммуникационных приложений.

4. Предложенная рекурсивная процедура дает возможность рассчитать требуемую величину ресурса соединительных линий мультисервисной иерархической сети доступа с учетом особенностей формирования и обслуживания поступающих потоков заявок.

**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 отраслевой научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (Москва, МТУСИ, 2012, 2013 г.), на научной сессии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, посвященной дню Радио (Москва, РНТОРЭС, 2013, 2017 г.), на международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (Москва, МТУСИ, 2017 г.), на международной научно-практической конференции «Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2017 г.), на международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий» (Новосибирск, 2017 г.), на кафедре ССиСК МТУСИ.

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 - в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

**Основное содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть (без приложений) изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка и 16 таблиц. Список литературы состоит из 160 наименований. Приложения изложены на 3 страницах машинописного текста.

## Раздел 1

### Мультисервисные сети доступа

#### 1.1. Введение

Сетью доступа принято называть сеть связи, обеспечивающую подключение терминальных устройств пользователя к окончному узлу мультисервисной транспортной сети [32]. Она связывает пользователя, который рассматривается либо в качестве источника, либо в качестве получателя трафика, с узлом доступа, находящимся на границе между сетью доступа и транспортной сетью. Сеть доступа состоит из разнородного оборудования, которое включает в себя как имеющую длительную историю использования медную распределительную сеть, так и решения, основанные на передовых оптических технологиях передачи информации.

Сеть доступа является одним из самых ценных активов оператора. По мнению экспертов, ее стоимость в десятки раз превосходит стоимость опорной сети [86,117]. Ее ценность выражается не только в денежном выражении, но также и в том, что сети доступа являют собой физическую среду, по которой оператор представляет услуги конечному пользователю. От качества предоставления услуги существенно зависят доход и лояльность абонента выбранному оператору.

Планирование ресурса передачи информации сетей доступа выполняется стандартными методами с использованием величины предложенного трафика, которая оценивается из маркетинговых исследований, и значений нормативных показателей качества его обслуживания, заданных регулятором и следующих из рекомендаций организаций, работающих в области стандартизации процессов передачи информации по сетям связи [22,32,57,78,86] (более подробно вопросы планирования будут рассмотрены в подразделе 1.6).

Сети доступа в отличие от транспортной сети не планируются с избытком пропускной способности. Это может привести к перегрузке всей сети доступа или отдельных ее фрагментов. К основным причинам перегрузки следует отнести

сделанные ранее ошибки в определении величины ресурса коммутации и передачи информации, выход из строя части оборудования в результате стихийных бедствий, терактов, DDOS атак и т.п. [45-49,73,153] (более подробно виды и причины перегрузки будут рассмотрены в подразделе 1.7).

Наличие перегрузки в сетях связи, является основной причиной появления повторных запросов абонентов сети на получение требуемого сервиса [89,101-103]. Особенно сильно их влияние проявляется в тех сегментах сети, которые наиболее приближены к абонентам, т.е. в сетях доступа. Повторные вызовы приводят к лавинообразному росту трафика существенно ухудшая показатели обслуживания поступающих заявок на установление соединения (более подробно влияние повторных вызовов будет рассмотрено в подразделах 1.7, 1.8.2, 2.2.2).

Приведенное краткое обсуждение показывает, что сеть доступа является достаточно сложным объектом, построенным с использованием разнородного коммутационного оборудования и физических сред передачи информации. В силу перечисленных выше особенностей планирования и работы сети доступа в ней могут наблюдаться состояния перегрузки с резким ухудшением качества обслуживания пользователей услуг связи. Для борьбы с отрицательными последствиями этого явления используется ограничение доступа и увеличение пропускной способности сети. Различным аспектам научно-обоснованного применения этих подходов посвящено большое число опубликованных статей, монографий и технических отчетов. Тем не менее, нерешенные проблемы остались и они станут предметом анализа в последующих подразделах диссертационного исследования.

## **1.2. Сети доступа и перспективы их развития**

### **1.2.1. Эволюция сетей доступа**

Развитие сетей доступа в последние 10 — 20 лет во многом связано с развитием сети Интернет. Необходимость передачи больших объемов трафика

данных вынудила производителей оборудования вести постоянную работу по совершенствованию сетей доступа [19,94,100,113,125-132]. При этом довольно успешно использовались два подхода. Один — основан на передаче трафика по имеющимся медным абонентским линиям с использованием аппаратуры DSL (Digital Subscriber Line) и различных ее модификаций, обозначаемых аббревиатурой DSLx. Второй — основан на передаче трафика по имеющийся кабельной инфраструктуре, изначально предназначенной для передачи телевизионного сигнала. Этот стандарт носит название DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification). Услуги связи с использованием каждой из отмеченных технологий носят общее название Triple-Play (тройной пакет услуг) и состоят в обеспечении высокоскоростного доступа в сеть Интернет, предоставлении голосовой связи и обеспечении доступа к пакету телевизионных каналов [76,78,86,110].

Дальнейшее развитие сетей доступа относится к использованию оптических каналов [60]. Оптические каналы имеют довольно много преимуществ по сравнению с медными и кабельными линиями доступа. Среди них: существенно меньшее затухание, слабая зависимость от внешних электромагнитных полей. Среди недостатков — высокая стоимость компонентов, обеспечивающих передачу сигнала, например, лазеров. Чтобы оправдать вложенные средства, эта аппаратура должна использоваться по возможности большим числом пользователей. В результате оптические линии стали применяться в решениях типа FTTx (Fiber To The X), где символ X в зависимости от ситуации используется для обозначения узла X=N, группы домов X=C, точки распределения X=DP, здания X=B и т.д. Тем самым сокращается путь движения трафика к абоненту по медной или кабельной распределительной сети. Меньшие расстояния позволяют увеличить пропускную способность традиционных медных и кабельных абонентских линий до сотен мегабит в секунду.

Развитие услуг передачи высококачественного видео вынудило операторов переходить к построению сетей доступа на базе технологии PON (Passive Optical Network). В подобных сетях используется древовидная структура доступа к

абонентам, позволяющая реализовать идею множественного доступа по одному волокну к некоторому числу абонентов. Архитектура PON представлена одним приёмопередающим модулем OLT (Optical Line Terminal), который обеспечивает передачу трафика абонентским устройствам ONT (Optical Network Terminal). Количество ONT зависит от скорости работы OLT и величины затухания сигнала и ограничено числом 128. Пример архитектуры PON показан на рисунке 1.1.

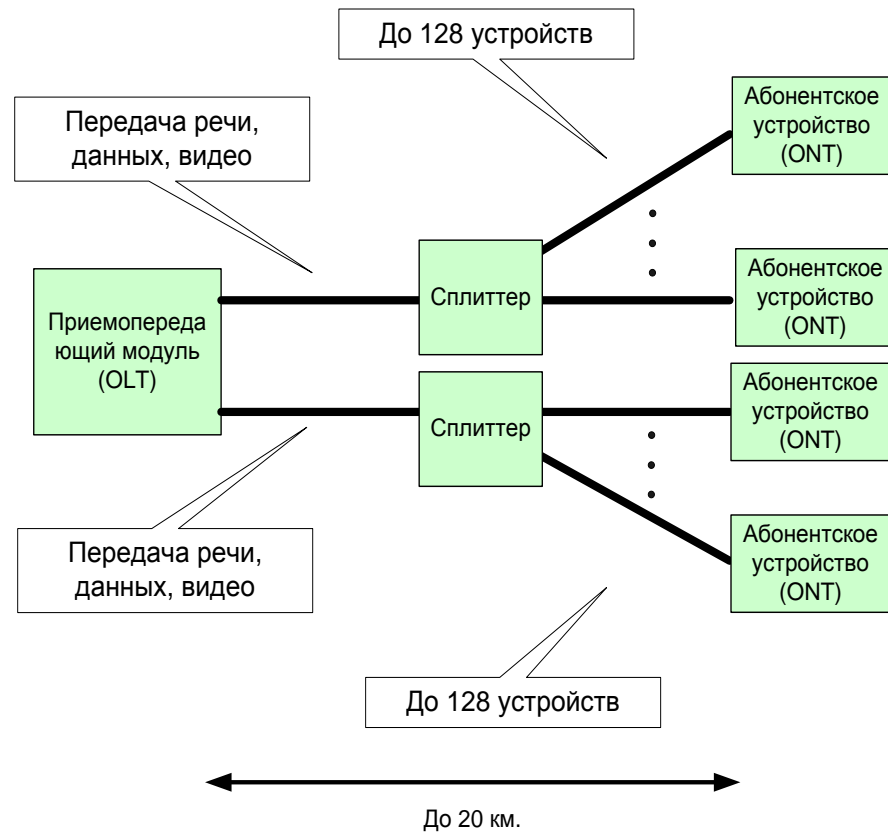


Рисунок 1.1– Архитектура PON

### 1.2.2. Особенности построения сетей доступа

По мнению экспертов компании Cisco [113] построение сетей доступа основано на следующих четырех вполне понятных принципах.

- **Доступность.** Услуги сети должны быть доступны на круглосуточной основе и с должным качеством. Выход из строя отдельных элементов

инфраструктуры сети не должен приводить к невозможности предоставления инфокоммуникационных сервисов.

- **Масштабируемость** Топологическое расширение сети новыми фрагментами и введение новых услуг не должно понижать качество обслуживания имеющейся абонентской базы и набора предоставляемых сервисов.
- **Безопасность.** Компоненты сети, отвечающие за безопасность и конфиденциальность предоставления сервисов, должны вводиться на стадии проектирования сети.
- **Управляемость.** Возможности по управлению сети должны быть понятны и несложны в реализации.

Всем этим качествам удовлетворяют сети доступа, построенные с использованием иерархических принципов [61-70,132,133-141]. Пример подобной сети показан на рисунке 1.2, где также отмечены пограничный контроллер сессий (SBC), реализующий функцию контроля доступа (CAC) в ситуации перегрузки (подробнее об этом см. подразделы 1.4 и 1.7).

При строительстве или модернизации сети необходимо четко сформулировать технические требования, которым должна удовлетворять сеть, дать характеристику имеющимся возможностям обслуживания абонентов на действующей сети и сконструировать топологию сети [3,10,17,21,24,32,40-42,76,98,99]. Уровень доступа должен обеспечить техническую возможность создания качественного соединения для пользователя услуг связи с целью получения требуемого сервиса [11]. Необходимо помнить, что трафик, обслуживаемый в других сегментах сети, попадает в сеть именно на уровне доступа. Без надлежащего контроля и анализа поступающих потоков сеть может быть перегружена поступающими заявками, что в свою очередь может привести к потере ее работоспособности. Особенно ярко это проявляется в ситуации перегрузки (см. подраздел 1.7), когда сеть заполняется потоками повторных заявок [25,26,31,33]. В этой ситуации каждая первичная заявка может инициировать до нескольких десятков повторных запросов. Каждый из них

обрабатывается управляющими устройствами сети как первичный вызов. Это значительно (до нескольких раз) перегружает работу систем управления установления соединения [81-93] (см. рисунок 1.2).

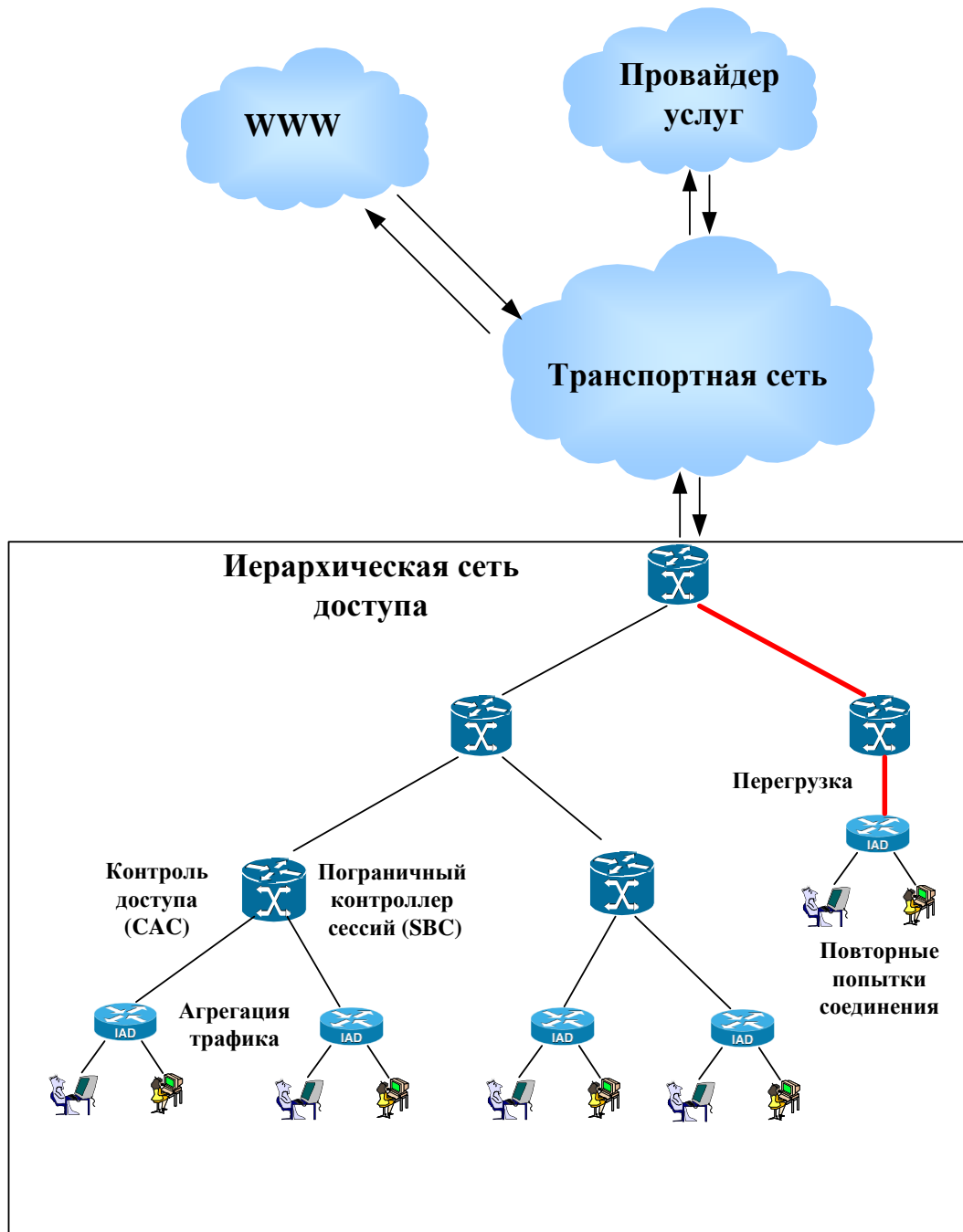


Рисунок 1.2 – Структура иерархической сети

На уровне доступа подключение абонентов к сети осуществляется с использованием большого количества разнообразных устройств доступа, включая



компьютеры, IP-телефоны, видеокамеры, системы видеоконференцсвязи, при этом может применяться как проводной доступ, так и беспроводной [14,78,86]. Большую роль в построении сети доступа и ее функционировании играет набор сервисов, который будет предоставлен пользователю. Поскольку ресурс всегда ограничен, то поступающие потоки трафика необходимо сегментировать согласно их требованиям к скорости передачи, терпимости к задержке в точках коммутации и т.д. [125-132]. Эти вопросы будут рассмотрены в следующем подразделе.

### **1.3. Услуги перспективных систем связи**

#### **1.3.1. Эволюция сервисов**

В соответствии с прогнозами специалистов компании Cisco<sup>1</sup> развитие телекоммуникационного рынка с 2015 г. до 2020 г., пройдет под знаком дальнейшего роста объема IP-трафика и усиливающей роли смартфонов в генерации этого трафика. К 2020 г. средний ежемесячный объем трафика, передаваемого в IP-сетях, достигнет 194 эксабайтов ( $10^{18}$  байтов) (ежегодный прирост в среднем 22%). IP-трафик, от смартфонов к 2020 г. достигнет 30% от общего объема IP-трафика и превысит IP-трафик от персональных компьютеров (29%). К 2020 г. трафик от беспроводных и мобильных устройств составит две трети общего IP-трафика. При этом число устройств, подключенных к IP-сетям в три раза превысит общую численность населения земного шара. По сравнению с 2015 г. скорость широкополосного доступа к 2020 г. удвоится и достигнет величины 47,7 Мбит/с. Изменится и структура трафика. Так к 2020 г. 82% интернет-трафика потребительского сектора составит передача видео трафика. Темпы роста, тип и сегментация IP-трафика на основе данных компании Cisco (см. предыдущую ссылку), показаны в таблице 1.1.

В таблице 1.1 интернет-трафик относится к всем видам IP-трафика, пересылаемого в транзитной части сети интернет. IP-трафик потребительского

---

<sup>1</sup><http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>.

сектора относится к трафику, генерируемому домовладениями, включая квартиры, учебные заведения и интернет-кафе. IP-трафик бизнес сектора включает в себя трафик, генерируемый частными компаниями и государственными организациями. Мобильный IP-трафик включает в себя трафик, генерируемый в сетях мобильной связи и разного рода переносимыми устройствами. Корпоративный IP-трафик относится к трафику, порожденному в корпоративном секторе, а также к IP-трафику телевидения и видео по запросу.

Таблица 1.1.

Глобальный IP-трафик (в эксабайтах в месяц), 2015-2020 гг. (по данным компании Cisco)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Тип						
Фикс. интернет	49,494	60,160	73,300	89,012	108,102	130,758
Корп. IP-трафик	19,342	22,378	25,303	28,155	30,750	33,052
Моб. IP-трафик	3,685	6,180	9,931	14,934	21,708	30,564
Сегмент						
Потребит. сектор	58,539	72,320	89,306	109,371	133,521	162,209
Бизнес сектор	13,982	16,399	19,227	22,729	27,040	32,165
Общий IP-трафик	72,521	88,719	108,533	132,521	160,561	194,374

Как уже было отмечено, одним из основных трендов развития телекоммуникационного рынка является увеличение доли разных форм видеотрафика в общем объеме трафика, передаваемого посредством сети интернет. Темпы роста, тип и сегментация интернет-трафика потребительского сектора (в эксабайтах в месяц) в 2015-2020 гг. на основе данных компании Cisco (см. ссылку на предыдущей стр.) показаны в таблице 1.2.

В таблице 1.2 интернет-видео включает в себя короткие видеоролики, например, полученные в видеохостинге Youtube, а также более длинные записи, например, предлагаемые на веб-сайте Hulu. К этому же типу видеосервисов

Таблица 1.2.

Структура интернет-трафика потребительского сектора (в эксабайтах в месяц),  
2015-2020 гг. (по данным компании Cisco)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Тип сети						
Фикс. интернет	39,345	48,223	59,294	72,442	88,399	107,395
Моб. интернет	3,027	5,127	8,326	12,609	18,436	26,080
Сегмент						
Интернет-видео						
Браузинг, электронная почта	7,558	9,170	11,061	12,752	14,060	17,006
Совместное исп. файлов	5,965	5,938	5,858	5,742	5,645	5,974
Онлайн игры	0,082	0,126	0,189	0,294	0,421	0,568
Общие показатели						
Интернет-трафик потр. сектора	42,372	53,351	67,621	85,051	106,834	133,454
Общий IP-трафик	72,521	88,719	108,533	132,521	160,561	194,374

относятся записи онлайн покупок, аренды, а также данные, полученные с использованием вебкамер. Трафик, порожденный работой в поисковых системах и посылкой электронной почты, не включает в себя совместное использование файлов, к которому относится трафик, связанный с работой файлообменных систем.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что в перспективе передача по сети разных форм видеоданных будет доминировать в общей структуре трафика. Так в 2020 г. видеотрафик превысит 80% общего объема интернет-трафика потребительского сектора. Передача трафика видео осуществляется в соответствии с положениями обслуживания трафика реального времени. Эти особенности передачи видео необходимо учитывать при планировании

пропускной способности звеньев сетей доступа. Они будут рассмотрены в следующем подразделе.

### **1.3.2. Классификация сервисов**

Как уже было сказано развитие телекоммуникационной отрасли идет по пути увеличения количества сервисов, предоставляемых пользователям услуг связи. Сервисы отличаются своими требованиями к условиям передачи, которые необходимо учитывать в процессе их предоставления. Эти ограничения, с одной стороны, затрудняют процесс обслуживания соответствующих потоков трафика, а с другой, — могут использоваться для повышения эффективности использования ресурса передачи информации.

Обратимся к классификации сервисов, предложенной в рекомендации МСЭ-Т Y.1541<sup>2</sup>. В соответствии с текстом рекомендаций сервисы подразделяются на классы в зависимости от величин характеристик передачи IP-пакетов: задержки доставки, вариации задержки доставки, доли потерянных пакетов и доли пакетов, переданных с ошибкой. Величины перечисленных показателей, определяющие шесть классов сервиса, заданы в таблице 1.3.

В этих же рекомендациях указаны типы трафика, относящиеся к каждому из перечисленных классов. К классу 0 относятся потоки реального времени с высокой чувствительностью к вариации задержки, например, высококачественные IP-телефония и видеоконференцсвязь. К классу 1 относятся потоки реального времени в определенной степени чувствительные к вариации задержки, например, средне и низкокачественная IP-телефония, и видеоконференцсвязь. К классу 2 относится передача данных, требующих соблюдения высокой степени интерактивности, например, пересылка данных сигнализации. В класс 3 включены сервисы передачи данных, в определенной степени требующих соблюдения условий интерактивности, например, некоторые

---

<sup>2</sup> ITU-T Recommendation Y. 1541. Network performance objectives for IP-based services. May, 2002

Таблица 1.3.

Показатели, определяющие шесть классов инфокоммуникационных сервисов согласно рекомендации МСЭ-Т Y.1541

Характеристики доставки IP-пакетов	Классы качества передачи информационных потоков					
	0	1	2	3	4	5
Задержка доставки IP-пакета, IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	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 X $10^{-3}$	1 X $10^{-3}$	1 X $10^{-3}$	1 X $10^{-3}$	1 X $10^{-3}$	Не опр.
Доля IP-пакетов, переданных с ошибкой, IPER	1 X $10^{-4}$	1 X $10^{-4}$	1 X $10^{-4}$	1 X $10^{-4}$	1 X $10^{-4}$	Не опр.

виды транзакций. К классу 4 относится передача данных чувствительных к потере информации в процессе пересылки по сети, например, массивы данных, потоковое видео. И наконец, к классу 5 относится передача трафика традиционных приложений IP-сетей с характеристиками передачи по умолчанию.

Как уже было отмечено в предыдущем подразделе, доминирующую роль в общем объеме трафика в перспективных сетях связи, будет играть предоставление разного вида видеосерверов. Трафик данного типа относится к классам 1 и 2 и носит общее название трафик реального времени. Соответствующие информационные потоки передаются с минимальной задержкой. Оценка необходимого ресурса передачи информации для

обслуживания трафика данного типа происходит с использованием нормативных значений характеристик, которые будут введены в следующем подразделе [14,15,75,78,86,110,133,152].

### **1.3.3. Характеристики обслуживания сервисов реального времени**

Выбор характеристик основан на отмеченных свойствах трафика сервисов реального времени. Соответствующий трафик пришел из сетей коммутации каналов. Естественно предположить, что процесс предоставления заказанных сервисов удовлетворяет заданным нормам, т.е. задержка передачи IP-пакетов и её вариация контролируются сетевыми механизмами (о них пойдет речь в подразделе 1.5). Тогда основным показателем, определяющим достаточность ресурса при обслуживании трафика реального времени, будет доступность канального ресурса, которая характеризуется долей отказов в установлении соединения [86,110,133].

Сформулированный подход будет использоваться далее при разработке методик оценки пропускной способности звеньев мультисервисных сетей доступа. Дополнительной причиной выбора доли потерянных заявок в качестве основного показателя качества обслуживания абонентов является интегральный характер этой характеристики, а также легкость ее измерения и моделирования [22,115]. Доля потерянных заявок оценивается в результате применения процедуры контроля за доступом поступающих заявок. Особенности ее реализации будут рассмотрены в следующем подразделе.

## **1.4. Контроль доступа**

### **1.4.1. Введение**

Контроль доступа (Admission Control) [117] выполняет превентивные функции контроля за допуском новых соединений с тем, чтобы сохранить

показатели QoS (долю потерянных пакетов, задержку и т.д.) в существующих соединениях. В случае необходимости поступившей заявке может быть отказано в обслуживании. Решение о приеме или отказе принимается на основе сведений о состоянии оборудования передачи информации или коммутации. Это может быть либо степень загруженности коммутаторов на пути следования трафика, либо уровень занятости линий передачи информации в рассматриваемом маршруте движения трафика.

На практике обычно применяется второй из перечисленных критериев [117]. Заявка принимается, если во всех линиях маршрута пересылки трафика, ассоциированного с обслуживанием принятой заявки, имеется достаточно ресурса передачи информации с тем, чтобы обслуживание заявки совместно с другими принятыми заявками прошло с заданным качеством.

Рассмотренный механизм носит название «контроль доступа на основе занятости ресурса» (Capacity Admission Control – SAC). Он отличается от двух других процедур контроля доступа, имеющих ту же аббревиатуру Call Admission Control и Connection Admission Control. Первая из отмеченных процедур имеет особенности, относящиеся к приему заявок на установление соединения для передачи речи. Вторая – относится не к созданию путей «точка-точка» для обслуживания в реальном времени поступившей заявки, а к резервированию ресурса передачи трафика в ядре MPLS-сети для передачи агрегированного трафика от точки входа до точки выхода. В дальнейшем аббревиатура SAC будет означать организацию доступа только на основе занятости ресурса.

Процедура SAC ограничивает предложенный трафик с тем, чтобы он не превысил имеющейся пропускной способности системы связи. Даже в ситуациях, когда ресурс передачи информации рассчитан по пиковым значениям поступления пакетов обслуживаемых коммуникационных приложений (например, VoIP) и казалось бы все имеющиеся заявки должны быть приняты, необходимо учитывать возможность единичных или множественных выходов из строя элементов оборудования, в результате которых происходит деградация качества обслуживания абонентов. В этой ситуации только наличие механизма SAC

позволит в режиме реального времени ограничить поступающий трафик в соответствии с имеющейся пропускной способностью системы.

#### **1.4.2. Параметры и характеристики процедур доступа**

Формализованное описание процедуры САС основано на введении параметров, определяющих особенности ее реализации [117]. К ним относятся начальные и конечные точки (IP-адреса) резервирования ресурса в сети связи; алгоритм оценки достаточности ресурса для приема заявки; определение и поддержка качества обслуживания соединения с использованием имеющихся механизмов (Diffserv, Intserv); уровень приоритета в обслуживании заявки. Основные моменты применения концепций Diffserv и Intserv будут далее рассмотрены (подразделы 1.4.4 и 1.5). Обсудим особенности формирования алгоритма оценки достаточности ресурса для приема заявки [117].

Решений, зависящих от условий передачи трафика, существует очень много. Простейшие, а значит самые употребительные, относятся к классу параметризованных алгоритмов. Для их построения необходимо определить дескриптор трафика, который задает потребность в ресурсе передачи информации у поступившей заявки, и сравнимый дескриптор, оценивающий имеющийся ресурс. Решение о приеме заявки принимается на основе сравнения численных значений обоих показателей. В качестве дескриптора трафика можно взять значение пиковой интенсивности поступления информации в потоке, ассоциированном с обслуживанием заявки. Это решение отличается простотой, однако существенно переоценивает потребности в ресурсе, не учитывает возможности статистического мультиплексирования трафика на уровне пакетов, поэтому неэффективно.

Сформулированные недостатки отчасти устраняет использование в качестве дескриптора понятия эффективной скорости передачи информационного потока. Ее величина лежит между средней и пиковой скоростями передачи информации



анализируемого потока и учитывает свойство статистического мультиплексирования пакетизированного трафика. Имеется много литературы, посвященной исследованию этого понятия [110]. Можно выделить два подхода к оценке эффективной скорости передачи. В первом используются достаточно сложные математические построения, основанные на результатах теории вероятностей и относящиеся к концепции больших уклонений [142]. Второй подход ориентирован на эмпирические соотношения [110,146]. Более подробно их реализация будет рассмотрена в подразделе 2.2.3. Возможно и дальнейшее усложнение дескрипторов трафика, основанное на введении нескольких параметров, описывающих импульсный характер нагрузки. Однако теоретический анализ особенностей их применения в мультисервисных сетях связи встречает определенные затруднения и по этой причине не рассматривается.

Далее при построении модели сети доступа (см. раздел 2) будем придерживаться следующего алгоритма оценки достаточности ресурса. Заявка принимается, если сумма значений используемого ресурса  $r$  и ресурса, требуемого для обслуживания поступившей заявки,  $d$ , не превосходит имеющегося ресурса  $c$ . Таким образом, для приема заявки необходимо выполнение неравенства:

$$r + d \leq c \quad (1.1)$$

Величины  $r$ ,  $d$ ,  $c$  выражены в битах в секунду, а  $d$  представляет из себя значение эффективной скорости передачи информационного потока, относящегося к обслуживанию анализируемой заявки (см. подраздел 2.2.3).

### **1.4.3. Сценарии реализации процедур доступа**

По мнению экспертов [117] нет универсального сценария реализации процедуры доступа заявок. Можно говорить о множестве решений, учитывающих те или иные особенности рассматриваемой сети, в их числе: реализованные механизмы поддержки качества обслуживания, применяемые технологии

передачи информации и т.д. Более того появляются и новые подходы к решению проблемы допуска заявок, основанные на последних достижениях в области управления трафиком.

В соответствии с [117] разделим используемые сценарии доступа на три группы (см. рисунок 1.3 [117]). К первой группе относятся алгоритмы, где решение о допуске заявки принимается на основе периодических измерений состояния сетевых ресурсов между конечными точками движения трафика, связанного с ее обслуживанием. Во второй группе объединены алгоритмы, где допуск заявки к обслуживанию основан на информации о наличии необходимого объема ресурса в узлах и линиях, составляющих маршрут движения трафика. Анализ состояния маршрута происходит с использованием протоколов сигнализации транспортного уровня RSVP (см. подраздел 1.4.4) или NSIS.

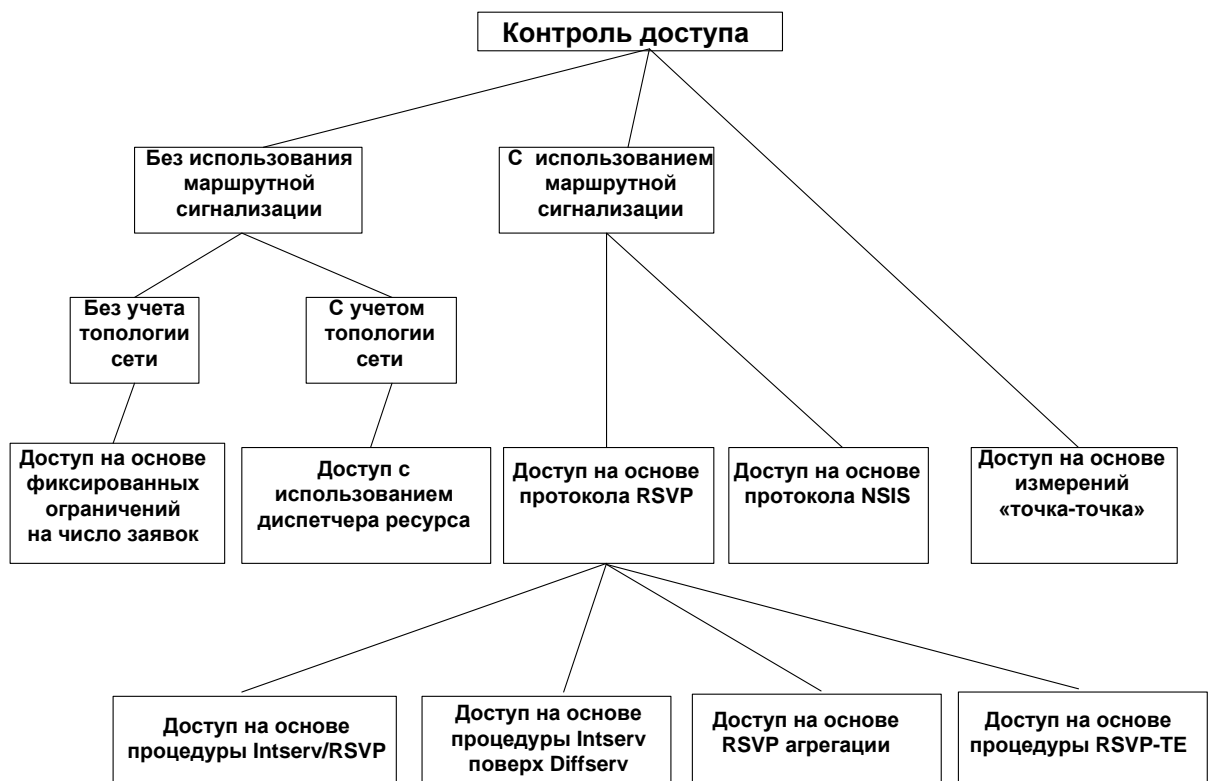


Рисунок 1.3 – Классификация алгоритмов контроля доступа заявок

К третьей группе относятся алгоритмы, где состояние загруженности маршрута не анализируется, а решение о допуске заявки принимается либо на основе ограничений на число одновременно обслуживаемых заявок между

заданными конечными точками маршрута, либо на основе информации о загруженности ресурса сети, получаемой с использованием так называемого «диспетчера ресурса передачи» (Bandwidth Manager). Первый из отмеченных в третьей группе подходов довольно прост в использовании, но здесь не учитывается топология сети. Он больше приспособлен для обслуживания моносервисного трафика, например, VoIP. Следующий подход более универсален. Диспетчер оценивает достаточность ресурса передачи для приема заявки. Это можно сделать на основе имеющейся информации о занятости ресурса в маршруте следования трафика или провести необходимые измерения. После этого заявка либо принимается и делаются необходимые изменения в информации о занятости ресурса, либо она получает отказ.

#### **1.4.4. Доступ на основе Intserv/RSVP**

Архитектура Intserv основана на предварительном резервировании сетевых ресурсов. Ее основной функцией является обеспечение требуемого качества обслуживания информационного потока ассоциированного с обслуживанием принятой заявки. Действие Intserv описано в рекомендации RFC 1633 [108]. В модели Intserv имеются следующие три подсистемы [117].

**Классификация.** Она выполняется для каждого потока в узлах, поддерживающих функциональность Intserv. Исходной информацией для классификации являются IP-адреса начальной и конечной точек пересылки трафика, номера портов UDP/TCP начальной и конечной точек пересылки трафика и уровень приоритета. Все пакеты, принадлежащие одному потоку, имеют одинаковый класс обслуживания и обрабатываются по одним правилам.

**Планировщик.** В модели Intserv выбор ожидающих пакетов из очереди осуществляется в соответствии с проведенной классификацией. При этом пакеты потоков, получивших одинаковый класс обслуживания могут обрабатываться из одной очереди.

**Контроль доступа.** Для обеспечения требуемого качества обслуживания потока трафика, ассоциированного с поступившей заявкой, анализируется наличие необходимого ресурса на каждом звене маршрута следования трафика.

Передача трафика каждого потока по правилам архитектуры Intserv начинается после резервирования необходимого объема ресурса в линиях связи, составляющих маршрут следования трафика, относящегося к обслуживанию поступившей заявки.

Для рассматриваемой архитектуры эту функцию реализует протокол транспортного уровня RSVP [109]. Он поддерживает односторонние соединения. Если по условиям обслуживания заявки требуется установить двустороннее соединение, то RSVP применяется в каждую сторону т.е. два раза. Резервирование ресурса выполняется по направлению от получателя информации к источнику информации. Это оптимизирует процесс передачи информации в случае многоадресной рассылки, также поддерживаемой RSVP. Рассматриваемый протокол для построения пути движения трафика использует имеющиеся таблицы маршрутизации и протоколы внутрисетевой маршрутизации IGP (Interior Gateway Protocol) такие как: OSPF (Open Shortest Path First) и ISIS (Intermediate System to Intermediate System). Если на выбранном протоколом пути нет достаточного ресурса, то заявка получает отказ, даже если можно построить альтернативный маршрут, в котором необходимый ресурс имеется. Состояние резервирования ресурса необходимо периодически обновлять. Если это не происходит, то резервирование прекращается.

#### **1.4.5. Применение процедур контроля доступа**

Основная область практического применения архитектуры Intserv – это поддержка сервисов реального времени по определению чувствительных к задержкам. Главным образом это пересылка разных форм голосового и видео

трафика. Поскольку диссертационное исследование посвящено анализу особенностей пересылки трафика реального времени в сетях доступа, то далее будет предполагаться, что для контроля доступа заявок в сеть и их последующего обслуживания используется связка Intserv/RSVP. Однако это предположение не ограничивает область применения полученных далее результатов. Если используемый механизм доступа и правила обслуживания поступившей заявки обладают тем же функционалом, что поддерживается связкой Intserv/RSVP, включая параметризованный алгоритм доступа в форме (1.1), то это означает возможность применения полученных далее результатов и в этом случае.

Как уже было отмечено, положительной характеристикой организации доступа по правилам Intserv/RSVP является предоставление гарантированных показателей обслуживания поступающих заявок, а также выполненная стандартизация решения и его поддержка большинством операционных систем. Этот факт имеет большое значения для практических приложений, имея ввиду рост объема видео трафика, где требуются перечисленные свойства обслуживания поступающих заявок,

В числе недостатков следует отметить плохую масштабируемость. Она связана с большим объемом работ при классификации трафика и резервировании ресурса при увеличении числа потоков и длительности маршрута. Отрицательное влияние этой характеристики снижается, если учесть рост быстродействия вычислительных систем, а также изменить сценарий применения контроля доступа. По мнению экспертов [117] резервирование ресурса имеет смысл проводить не по всей длине маршрута (принцип «точка-точка»), а только в сегменте сети доступа от источника до ядра сети и далее от ядра сети до получателя информации. Здесь используется тот факт, что ядро проектируется с избытком пропускной способности и резервирование ресурса здесь можно и не проводить.

Заявка, принятая к обслуживанию в процессе реализации процедуры доступа, не должна ухудшить качество передачи информации в уже установленных соединениях. Для применения этого положения в пакетных сетях реализован ряд

механизмов, обеспечивающих требуемые значения показателей QoS. Они будут рассмотрены в следующем подразделе работы.

## 1.5. Механизмы поддержки QoS

Передача трафика реального времени в IP-сетях нуждается в средствах контроля. Несколько подобных процедур разработаны в комиссиях IETF (Internet Engineering Task Force). Их действие направлено на предоставление качественного обслуживания в IP-сетях. Сформулируем основные положения соответствующих руководств. Это модели: интегрированных услуг (Integrated Services – IntServ), дифференцированных услуг (Differentiated Services – DiffServ) и многопротокольной коммутации по меткам (Multi-Protocol Label Switching – MPLS) [10,11,21,22,39-42,55,75,86,110,125,128]. Дадим им краткую характеристику.

Реализация архитектуры IntServ направлена на организацию маршрута следования трафика реального времени и вкратце рассмотрена в подразделе 1.4.4. Совместно с протоколом RSVP модель IntServ обеспечивает требуемые показатели QoS. Действие процедур DiffServ основано на введении метки класса обслуживания и дальнейшем ее использовании в процессе передачи IP-пакетов по сети. Каждый узел сети имеет возможность поддержки нескольких десятков классов обслуживания, перечисленных в соглашении об обслуживании SLA (Service Level Agreement). Концепция DiffServ состоит из области DiffServ и алгоритмов обработки и пересылки IP-пакета по узлам из области DiffServ. Сама область DiffServ разделена на граничный сегмент и ядро. Граничные узлы могут быть входящие и исходящие. Исходящий узел формирует информационный поток согласно принятому SLA. При этом выполняется дифференциация и последующая агрегация потоков трафика согласно сформулированным требованиям о качестве обслуживания. Контролируемые характеристики потока — усреднённая интенсивность и максимальный размер пульсации. Пакетам, не удовлетворяющим заданным требованиям, могут снизить приоритет или убрать из рассмотрения. Действие процедур DiffServ показано на рисунке 1.4.

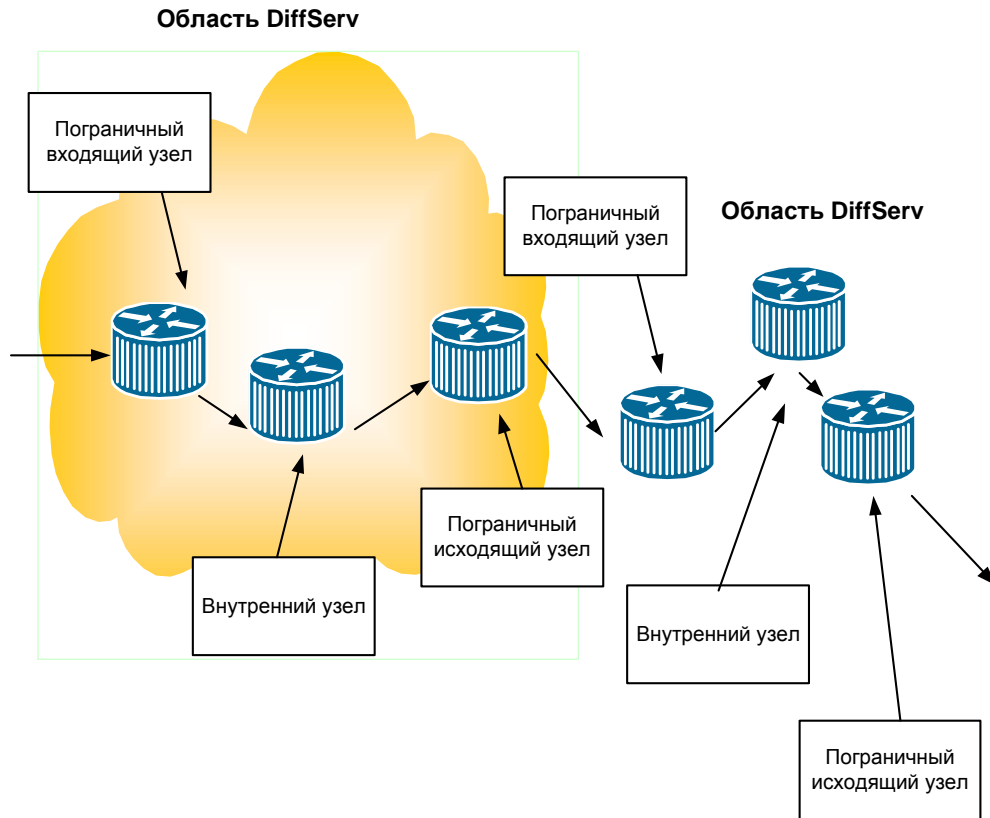


Рисунок 1.4 - Структура модели DiffServ

В области DiffServ информационные потоки, принадлежащие одному классу, обрабатываются по одним и тем же правилам и получают одинаковый уровень обслуживания. В отличие от процедур IntServ механизм DiffServ достаточно просто масштабируется. Увеличения количества соединений не приводит к росту числа агрегированных потоков. К недостатку следует отнести локальный характер применения данной процедуры.

Реализация процедур MPLS [14,106,111,158] основана на создании и последующем использовании виртуальных маршрутов по пути следования потока трафика реального времени. Фундаментальным принципом MPLS является использование коммутации по меткам. Формулировка этого принципа фигурирует в названии данной технологии переноса информации. Метки присваиваются пакету на входе в сеть MPLS, и далее именно они, а не IP-адреса, применяются при построении маршрута передачи пакета по сети MPLS. Для этого вводится понятие класса эквивалентной пересылки FEC (Forwarding Equivalence

Class), к которому относятся все пакеты, объединенные с целью их последующей обработки в одинаковых условиях.

Маршрут передачи пакетов из одного класса FEC, носит название путь коммутации меток LSP (Label Switched Path). Обычно он включает в себя некоторое количество узлов коммутации меток LSR (Label Switching Router), связанных линиями передачи данных, и эквивалентен виртуальному пути. Граничные узлы LSR на маршруте LSP называются граничными маршрутизаторами меток LER (Label Edge Router). Они анализируют поступающие информационные потоки и задают начальную метку при входе в сеть, а также удаляют заголовок MPLS и направляют пакет согласно его IP-адресу назначения при выходе из сети MPLS. Действие процедуры MPLS показано на рисунке 1.5.

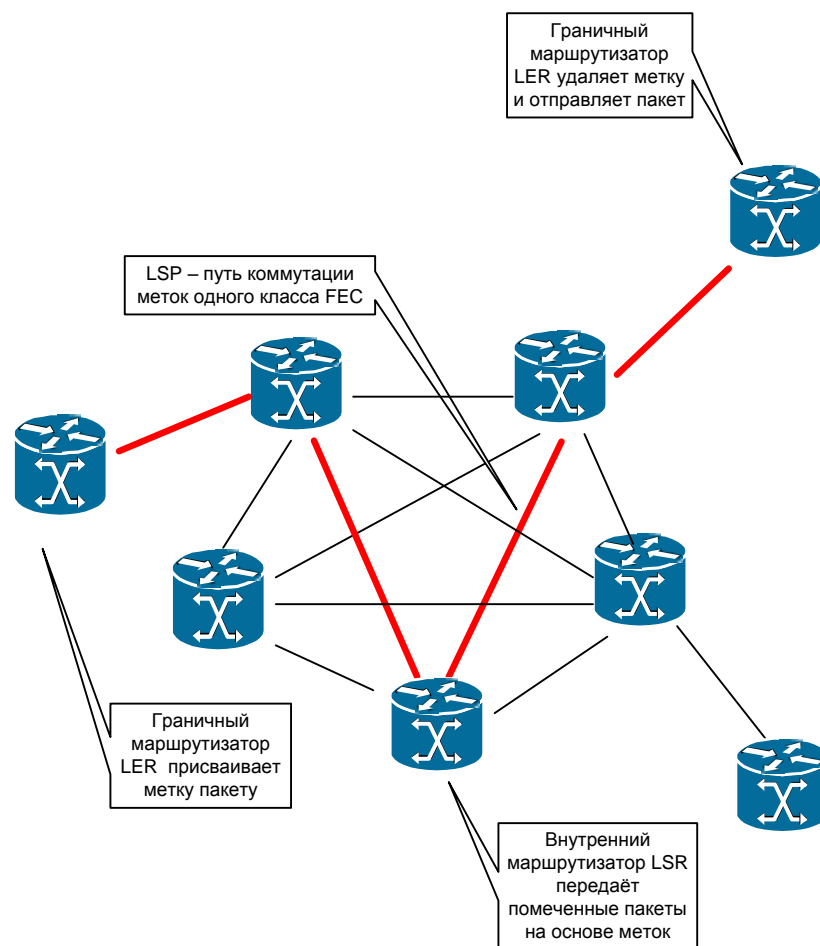


Рисунок 1.5 - Структура обработки пакетов в сети MPLS



К числу положительных моментов применения процедур MPLS эксперты относят возможность создавать виртуальные пути и осуществлять пересылку трафика с требуемым качеством в неоднородных сетевых структурах. Наличие механизмов IntServ, DiffServ и MPLS позволяет использовать при передаче трафика реального времени виртуальные маршруты, обеспечивающие требуемые показатели качества обслуживания IP-трафика. Следовательно, при оценке достаточности ресурса передачи информации можно использовать результаты теории телетрафика, полученные при оценке пропускной способности многопоточковых сетей коммутации каналов [4,6-10,11,12,13,18,26,110,142,143]. Эти вопросы будут рассмотрены в подразделе 1.6.

Потребности поставщиков услуг в механизме передачи информации, который бы отчасти обладал функциональностью, имеющейся в системах SDH, но при этом использовал преимущества пакетных технологий привели к созданию в 2008-2010 гг. расширения MPLS, носящего название MPLS-TP (Multiprotocol Label Switching - Transport Profile). Ряд рекомендаций IETF (Internet Engineering Task Force - Инженерный совет Интернета) [111,149] определяют основные моменты использования MPLS-TP. Комиссия МСЭ-Т на своем заседании [14] (Токио, 3-7 апреля 2017 г.) выразила намерение провести работу по одобрению пакета документов, относящихся к использованию MPLS-TP. Данная технология основана на транспортных принципах коммутации каналов и может быть использована для обслуживания трафика, требующего соединения «точка-точка», с применением коммутации по меткам. Эта технология уже внедрена в ряде компаний [162]. Ее использование в сети доступа позволяет создать универсальную транспортную среду «точка-точка» на базе принципов одной технологии, в данном случае MPLS.

Некоторые эксперты полагают [162], что решения на базе MPLS -TP будут обладать преимуществом перед аналогичными решениями на базе технологии Ethernet, ориентированными на установление соединения, а именно - PBB-TE (Provider Backbone Bridge Traffic Engineering - магистральные мосты провайдера с возможностью оптимизации и управления трафиком). Эта технология

стандартизована IEEE 802.1ah-2008. Следует отметить, что решения на базе PBB-TE, как и все решения с использованием Ethernet, примерно на 30-40 % дешевле. Скорее всего универсального решения не будет и все будут определять обстоятельства, в которых рассматривается задача передачи трафика приложений реального времени.

## **1.6. Планирование сетей доступа**

### **1.6.1. Методология планирования**

Планирование пропускной способности звеньев сети доступа является сложной задачей, естественным образом отражающей сложность объекта исследования. Для нахождения требуемого решения применяются соответствующие математические модели и разработанные на их основе алгоритмы [5,6,8,9,13,27-29,71,95,96,110,132,143,152,159,160]. Все чаще для поиска решения используются аппаратно-программные комплексы, которые значительно упрощают процедуру решения, устраняя необходимость для рядовых специалистов разбираться в сложностях математических расчетных методов [86]. Наличие подобного инструментария предоставляет оператору возможность существенно уменьшить инвестиционные и эксплуатационные затраты при решении задач планирования и модернизации сети [75-78].

В общем случае методология планирования ресурса звеньев сетей связи основана на решении задачи оптимизации пропускной способности соединительных линий сети. Формулировка задачи зависит от предположений, относящихся к модели формирования трафика. Используются два подхода: статичная модели трафика и динамичная модели трафика. В первом случае потоки трафика рассматриваются как потоки жидкости и элементы случайности в модели формирования потоков трафика не вводятся. Задача планирования формулируется как многопараметрическая оптимизационная проблема. Сеть состоит из некоторого набора маршрутов и надо распределить поступающие потоки трафика так, чтобы максимизировать некую целевую функцию,

зависящую от технических и экономических аспектов функционирования анализируемой системы связи [1-4,10,50-52,55,75-79].

Подобная оптимизационная задача может быть строго сформулирована математически. Для ее решения имеется ряд хорошо изученных подходов, которые представлены соответствующими программными средствами. Недостатком подобных методов является то обстоятельство, что здесь не учитывается случайный характер поступающих запросов на информационное обслуживание, следовательно, отсутствует возможность определить пропускную способность звена сети согласно предложенной потенциальной нагрузке и в соответствии с заданной нормой потерь заявок.

По этой причине, подходы, основанные на статичной модели трафика, в основном используются при анализе обслуживания потоков данных, допускающих возможность задержки в процессе передачи. Здесь заявки на передачу данных практически всегда принимаются на обслуживание и основной мерой качества передачи является время пересылки данных. Задачей диссертационного исследования является анализ пропускной способности сетей доступа при обслуживании трафика сервисов реального времени или трафика данных, обслуживаемых на условиях передачи трафика сервисов реального времени, т.е. с предоставлением фиксированной скорости передачи [96]. В этой ситуации математическая модель сети должна предоставить возможность оценки доли потерянных заявок. Она и будет исследоваться далее.

Задача оптимального планирования пропускной способности звеньев сетей доступа относится к разряду классических задач телетрафика [5,56,57,95,96,100,110,122,142-144]. Для сетей коммутации каналов эта задача решается с помощью алгоритмов оценки доли потерянных заявок, которые основаны на формуле Эрланга и многочисленных ее обобщений. Широкое распространение результатов, полученных с помощью формулы Эрланга и ряда ее обобщений, связано с тем, что эти результаты не зависят от вида функции распределения продолжительности времени занятия ресурса на передачу рассматриваемых потоков трафика [107,110,133,142,143]. Значение доли

потерянных заявок является функцией потенциальной загрузки системы связи, выраженной в среднем числе потенциальных соединений, а не в том, как конкретно моделируется время занятия ресурса на передачу информации пользователя услуг связи. Это свойство объясняет широкое распространение анализируемых результатов среди специалистов в области проектирования систем связи [139].

Для оценки доли потерянных заявок в мультисервисных системах связи получено мультисервисное обобщение модели Эрланга. Так же, как и для моносервисной модели Эрланга, полученные результаты не зависят от вида функции распределения длительности времени занятия ресурса на передачу анализируемых мультисервисных потоков трафика. Для мультисервисной модели Эрланга удалось найти рекурсивные формулы оценки доли потерянных заявок и других характеристик передачи трафика [120,133,139,141].

### **1.6.2. Последовательность решения задач планирования**

Последовательность решения задач планирования пропускной способности звеньев мультисервисных сетей доступа аналогична решению сформулированной задачи для мультисервисной сети, рассматриваемой на уровне поступления заявок на установление соединения с целью передачи трафика с фиксированными на время обслуживания требованиями к пропускной способности. Основные этапы решения этой задачи рассмотрены в [86,110,139]. Поскольку исследуемая сеть имеет достаточно сложную структуру, то ее анализ разбивается на отдельные части.

Вначале необходимо оценить интенсивности потоков трафика, поступающих на отдельные линии сети. Для этого необходимо формализовать процесс передачи информационных потоков. После реализации этой процедуры можно определить интенсивности потоков заявок, требующих предоставления ресурса передачи информации на каждой из имеющихся линий сети. Далее в зависимости от

ситуации выбирается способ оценки показателей качества обслуживания заявок. Обычно это приближенный метод, основанный на результатах расчета характеристик отдельных звеньев, на каждый из которых поступает известное числа потоков заявок с заданными параметрами.

Для оценки характеристик качества обслуживания заявок на отдельном звене используются хорошо изученные и эффективные рекурсивные расчетные алгоритмы [120,133,139,141]. Далее требуется учесть зависимость обслуживания заявок на отдельных звеньях между собою. Это необходимо для расчета характеристик качества обслуживания заявок на маршрутах анализируемой сети. Обычной практикой при решении этой задачи является использование метода просеивания поступающих потоков заявок [86,110,139,142,143,152]. Положительными моментами этой процедуры является простота реализации, а также возможность вести оценку необходимой пропускной способности звеньев на основе анализа потерь заявок на отдельных звеньях анализируемого маршрута. Для моделей иерархических сетей доступа с потерями существует эффективный алгоритм точной оценки характеристик потерь заявок на отдельных маршрутах, основанный на использовании метода свертки [139,140,152].

Поскольку передача информации в действующих и перспективных сетях связи происходит с использованием пакетных технологий, то необходимо учесть эффект статистического мультиплексирования, который реализуется на уровне поступления пакетов [128-132]. Для решения сформулированной задачи используется принцип эффективной скорости передачи [110,142]. Величина эффективной скорости передачи информационного потока, относящегося к обслуживанию анализируемого трафика, находится между средней и пиковой скоростями передачи информации пользователя услуг связи. Для оценки данного параметра применяются точные и приближенные методы, которые будут рассмотрены в подразделе 2.2.3. Использование эффективной скорости передачи позволяет увеличить значение объема потенциального трафика, который может быть обслужен с заданными параметрами качества.

Процедура использования модели с целью проведения необходимых расчетов

также выполняется в определенной последовательности. В начале с использованием данных измерений и маркетинговых исследований оценивается вид и интенсивность потенциального трафика от терминального оборудования сети связи [15,78,139]. К нему относятся разного вида абонентские терминалы; фиксированные и переносные вычислительные устройства; датчики телеметрии в виде веб-камер и другие подобные им устройства. Количество потенциальных соединений каждого типа определяется исходя из значений пиковой и средней скоростей передачи информации, которые далее служат основой для оценки эффективной скорости передачи. На величину потенциального трафика влияют значения поправочных коэффициентов, которые оценивают прогнозируемый рост числа потенциальных соединений в связи с увеличением абонентской массы, а также учитывают профиль возникающего трафика (период наибольшей потенциальной нагрузки) [110].

После этого определяются показатели качества обслуживания возникающих потоков трафика, которые будут использоваться для оценки достаточности ресурса передачи информации. Поскольку рассматривается процесс обслуживания трафика сервисов реального времени или трафика данных, обслуживаемых на условиях передачи трафика сервисов реального времени, т.е. с предоставлением фиксированной скорости передачи, то рассчитываемым показателем будет доля потерянных заявок. Предполагается, что маршруты движения трафика по сети фиксированы и не меняются в процессе установления соединения. Если есть альтернативные маршруты, то они должны быть заранее прописаны, как и объемы трафика, которые будут их использовать для доставки к месту назначения [86,110]. Маршрутная матрица определяет топологию сети. Существуют разные топологии сетей доступа, но наиболее распространенной является иерархическая структура [139]. Ее положительные стороны уже рассматривались в подразделе 1.2.2 и будут рассмотрены в подразделе 2.2.1. Если кратко, то среди достоинств иерархической топологии сети доступа следует упомянуть простые алгоритмы взаимодействия с сетями других операторов и отсутствие сложностей в реализации процедур расширения сети.

Далее рассматриваются экономические аспекты построения сети [115]. Основным моментом здесь является выбор оборудования, обеспечивающего требуемую функциональность по условиям обслуживания поступающих потоков трафика. Поставщиков может быть несколько, окончательный выбор может зависеть от многих факторов, часть из которых по вполне понятным причинам невозможно формализовать. После выбора поставщика (поставщиков) оцениваются объемы оборудования, которые обеспечат обслуживание поступающих потоков с заданным качеством, а также предполагаемые значения параметров CapEx и OpEx, определяющих соответственно капитальные и операционные расходы на строительство сети и поддержание ее работоспособности [78,86,110,115].

### **1.7. Перегрузка в сетях доступа**

Оценка ресурса передачи информации в сетях связи зависит от анализируемого сегмента сети. Транспортное ядро используется многими абонентами, поэтому обычно планируется с избытком пропускной способности. Сети доступа, напротив используются сравнительно небольшим числом абонентов. Закладывать излишки пропускной способности здесь экономически нецелесообразно, поскольку это приводит к значительному удорожанию сети. Такова практика планирования сетей связи [86,117].

Определение необходимого ресурса передачи осуществляется исходя из оценки величины предложенного трафика и значений нормативных показателей качества его обслуживания. Случайный характер трафика и его зависимость от реакции пользователя на разного рода события, связанные с его формированием, приводят к возникновению перегрузки сети [1,2,45-50,112,131]. Соответствующее явление означает такое состояние сети, при котором вследствие чрезмерной нагрузки оборудования передачи информации и коммутации происходит резкое ухудшение характеристик качества обслуживания абонентов. Отмеченная выше

практика планирования сетей говорит о том, что в состоянии перегрузки чаще попадают сети доступа нежели ядро сети. Рассмотрим вкратце основные причины возникновения этого явления.

Понятно, что в подобный режим работы сеть переходит либо при резком увеличении входного трафика, либо при существенном уменьшении производительности оборудования, которое используется для обслуживания поступающих информационных потоков. Увеличение объема предложенного трафика могут вызвать следующие события.

- Синхронизированное во времени обращение абонентов сети к популярным ресурсоемким сервисам. В качестве примера можно привести скачивание контента в процессе онлайн видеотрансляций резонансных спортивных мероприятий, концертов и других подобных им событий.
- Синхронизированное во времени обсуждение пользователями услуг связи резонансных событий: чрезвычайные ситуации [45-50], популярные общегосударственные праздники (Новый год, 8 марта, 23 февраля и т.п.), спортивные мероприятия, итоги выборов и т.д.
- Участие абонентов сети в популярных современных онлайн играх, как правило использующих качественный видеоконтент и требующий высоких скоростей передачи.
- Набирающая популярность работа на дому, связанная с опросами потенциальных покупателей, созданием и обменом мультимедийным контентом и т.д.

Недостаточная производительность оборудования коммутации и передачи информации может быть вызвана следующими причинами.

- Ошибками, внесенными на стадии планирования сети из-за недооценки объемов и видов предложенного трафика в следствии недостаточного обеспечения надежности, устойчивости и живучести сетевого оборудования [7,16,20,36,58,59,71,74,105].
- Выходом из строя оборудования по разным случайным причинам: механические повреждения, сбои электропитания, чрезвычайные



ситуации, к которым можно отнести, пожары, землетрясения, наводнения и т.п.

- Злонамеренный выводом из строя оборудования в результате терактов, а также получивших в настоящее время большое распространение реализации разных форм DDOS атак [153].

Эффектом, сопутствующим перегрузке в сетях связи, являются повторные запросы абонентов сети на получение требуемого сервиса. По понятным причинам особенно сильно их влияние проявляется в тех сегментах сети, которые наиболее приближены к абонентам, т.е. в сетях доступа (см. рисунок 1.2). Повторные вызовы приводят к лавинообразному росту трафика в отдельных направлениях. Только повторными вызовами можно объяснить резкий, до нескольких десятков раз рост трафика в результате синхронизированных во времени обращений абонентов сети к услугам связи при осуществлении разного рода резонансных событий. Каждый потерянный первичный запрос приводит к появлению повторного вызова. Поскольку сеть перегружена, то повторные вызовы с вероятностью близкой к единице снова получают отказ в установлении соединения. В чрезвычайных ситуациях по вполне понятным причинам настойчивость абонентов в установлении соединения весьма высока. Это ведет к тому, что число повторных вызовов на один первичный может достигать до нескольких десятков.

Так например, в результате землетрясения, произошедшего в г. Кобе (Япония, 1995 г.) [73] интенсивность трафика, генерируемого в сетях доступа, превысила известное из результатов измерений пиковое значение почти в 50 раз. Техническому руководству ведущего телекоммуникационного оператора Японии NTT пришлось блокировать более 90% всех поступающих вызовов, чтобы обеспечить связью приоритетных пользователей: полицию, госучреждения, больницы.

Основным способом борьбы с перегрузкой является ограничение доступа поступающих вызовов и увеличение пропускной способности звеньев сети. Теоретическим и практическим аспектам реализации первого из отмеченных

подходов посвящено много работ [117]. Результаты исследований обобщены в рекомендациях МСЭ-Т [127]. В практических приложениях механизм приема заявки или отказа в обслуживании носит общее название «контроль доступа» [110,117] и реализуется в пограничном контроллере сессий (SBS – Session Border Controller) сетей NGN, представляющим из себя оборудование операторского класса (программное или аппаратное), расположенное на границе между операторскими сетями или между операторской сетью и конечным пользователем (см. рисунок 1.2). У компании CISCO этот вид оборудования носит название CUBE (Cisco Unified Border Element) [150]. Более подробно действие механизма «контроль доступа», рассмотрено в подразделе 1.4.

Оценку последствий, к которым приведет ограничение доступа поступающих вызовов, необходимо проводить в рамках моделей с учетом эффекта повторения заблокированной заявки. Использование традиционных моделей теории телетрафика с потерями вызовов, получивших отказ в обслуживании, приводит к сильному завышению итогового результата, поскольку в этих моделях все поступившие вызовы трактуются как первичные [89,101-103].

Учет влияния повторных вызовов при анализе процессов функционирования систем связи приводит к достаточно сложным моделям. Трудности в их исследовании относятся к входному потоку. Даже, если предположить, что поступление первичных вызовов подчиняется закону Пуассона, то в суммарном потоке первичных и повторных вызовов интервалы времени между последовательными поступлениями вызовов уже зависят друг от друга [89,101-103].

Актуальность проблематики привела к появлению большого числа публикаций, где анализируются различные аспекты оценки характеристик качества обслуживания вызовов в системах связи с учетом возможности повторения заблокированной заявки. В обзорной статье J.R. Artalejo [102] приводятся ссылки на более чем 300 работ, вышедших за период с 2000 по 2009 гг, где исследуются модели систем связи с учетом эффекта повторных вызовов, возникающих в результате перегрузки оборудования коммутации или передачи

информации. И это только публикации в журналах, книги и отдельные главы в монографиях. К ним надо приплюсовать сотни докладов на конференциях и семинарах.

Более подробно анализ влияния повторных вызовов на характеристики качества обслуживания заявок в сетях доступа будет рассмотрен в подразделах 2.2 и 2.3, где будут получены формулы для косвенной оценки доли первичных и повторных вызовов в общем потоке поступающих запросов. Значение этой характеристики необходимо для реализации процедуры контроля доступа в ситуации перегрузки, поскольку доля вызовов, которым отказано в обслуживании должна соответствовать доле повторных запросов на установление соединения.

Ограничение доступа обычно применяется в ситуации, когда перегрузка носит случайный, а не систематический характер. В последнем случае необходимо наращивать пропускную способность звеньев сети в соответствии с методологией, изложенной в предыдущем подразделе. Решение сформулированной задачи будет получено в разделе 4 с использованием модели иерархической сети доступа и алгоритмов расчета ее характеристик, разработанных в разделах 2,3. При построении модели также необходимо знать трафик первичных попыток соединения.

## **1.8. Обзор выполненных исследований**

### **1.8.1. Анализ сетей доступа**

Мультисервисные иерархические сети доступа являются частным случаем моделей мультисервисных сетей [5,22,42,86,139,152]. По этой причине общие методы, разработанные для их исследования, используются и при анализе моделей сетей доступа. Приведем краткий перечень полученных результатов. Мультисервисная модель звена является многопоточковым обобщением классической модели Эрланга. Несмотря на присутствие произвольного числа поступающих потоков заявок, для нее удалось установить большинство результатов, полученных ранее для моносервисной модели. Надо отметить, что

эта модель давно известна в литературе по теории телетрафика [120,133,139,141,152]. В работах [142,143] доказаны свойства мультипликативности и независимости характеристик качества обслуживания заявок от функции распределения времени их обслуживания. Рекурсивный алгоритм расчета характеристик и его оптимизированная версия были получены в [104,116,120,133,139,141,152].

Следующим по сложности частным случаем модели иерархической сети доступа является модель звена с ограниченным доступом. В данной системе связи допуск заявок к обслуживанию основан на анализе информации о числе канальных единиц ресурса, занятых заявками рассматриваемого потока [80,86,110,133-136]. Для этой модели выполняется свойство мультипликативности стационарных вероятностей состояний марковского процесса, описывающего её функционирование [142,143], а для оценки характеристик используется метод свёртки, предложенный в [133] и затем обобщённый в [134,136].

Если анализ модели отдельного звена не вызывает больших затруднений, то оценка характеристик пропускной способности мультисервисных сетей является сложной задачей из-за огромного числа состояний и необходимости учёта взаимного влияния процессов обслуживания заявок в различных сегментах сети. Тем не менее для рассматриваемого класса моделей удалось доказать свойство мультипликативного представления вектора стационарных вероятностей, которое выполняется для моделей с пуассоновскими входными потоками и явными потерями заблокированных заявок [142,143]. Свойство мультипликативности даёт возможность найти точные значения характеристик для некоторых частных случаев исследуемой модели. В их числе важные для практического применения иерархические сети доступа. Алгоритм оценки характеристик подобных сетей основан на результатах [110,139,142,143,144,152]. Он рассмотрен в подразделе 3.2 и будет использоваться при построении приближенного алгоритма оценки, исследуемой в диссертационной работе модели иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов.

В приложениях оценка характеристик обслуживания заявок мультисервисной сети ведётся приближёнными методами. Наиболее удобным из них является метод просеивания заявок, изученный в публикациях [86,110,139,152,154]. Он рассмотрен в подразделе 4.4.2 и будет использоваться при построении методики оценки скорости звеньев иерархической сети доступа.

### **1.8.2. Анализ моделей с учетом эффекта повторных вызовов**

К настоящему времени опубликовано довольно много результатов, посвящённых исследованию систем распределения информации с учетом эффекта повторения заблокированного по разным причинам вызова. Обзор работ можно найти в [89,102,103,118]. Спектр выполненных исследований меняется в широких пределах: от работ, где предлагаются эмпирические методы расчета, основанные на инженерной практике или моделировании, до теоретических исследований, проведенных на высоком математическом уровне. Модели с учётом повторных вызовов позволяют анализировать влияние поведения пользователя услуг связи на процедуру формирования поступающих потоков заявок. Отмеченное свойство модели дает возможность провести близкую к реальности реконструкцию входных потоков трафика и учесть зависимости между отдельными частями поступающего общего потока трафика [25,26,31,33,34,54,64-66,82,91, 102,103,155,156].

Особенностью моделей с повторными вызовами является сложность поиска явных алгебраических выражений для оценки характеристик качества обслуживания заявок через значения входных параметров. Почти все такие случаи относятся к моделям с одним каналом и абсолютно настойчивым абонентом. В практических приложениях значения характеристик вычисляются алгоритмическими методами с применением средств вычислительной техники. Формализация процесса поступления повторных заявок, используемая в подразделе 2.2 диссертационной работы, следует [86,89]. В разделах теории

телетрафика, посвященных анализу моделей с учетом повторных вызовов [86,89] большинство предложенных расчётных алгоритмов основаны на приближённых методах оценки характеристик пропускной способности подобных моделей.

Одним из самых известных подходов является использование асимптотических выражений для показателей обслуживания заявок, полученных при стремлении входных параметров к своим предельным значениям [89,158]. Особую роль в перечне рассматриваемых с этой целью параметров играет интенсивность поступления повторных вызовов от одного абонента. Когда значение этого параметра стремится к бесконечности или к нулю, то анализируемая модель сети доступа, в которой присутствуют повторные заявки, трансформируется в соответствующую модель сети доступа с потерями поступающих заявок с той же (в случае стремления интенсивности повторения к бесконечности) или с измененной интенсивностью поступления первичных вызовов (в случае стремления интенсивности повторения к нулю). Последний из отмеченных подходов рассмотрен в подразделе 4.3 и будет использоваться при построении приближенного алгоритма оценки, исследуемой в диссертационной работе модели иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов.

Анализ проделанных исследований показал, что в ранее опубликованных работах отсутствуют результаты, относящиеся к исследованию важного для практических приложений класса моделей иерархических сетей доступа с учетом влияния повторных вызовов. Этот факт подчеркивает необходимость и актуальность проведения соответствующего исследования, выполненного в диссертационной работе.

## **1.9. Выводы и постановка задачи исследования**

Выполненный в данном разделе анализ особенностей построения и исследования мультисервисных сетей показал необходимость учета влияния поведения абонента на характеристики работы сети в условиях локальных

перегрузок, вызванных выходом из строя оборудования, ошибками планирования, стихийными бедствиями и т.д. Особенно важно учитывать это явление в сетях доступа, которые в отличие от ядра сети не планируются с избытком пропускной способности. В противном случае могут появиться ошибки в оценке необходимого ресурса передачи звеньев сети. Для устранения отрицательных последствий этого явления предлагается вести оценку характеристик сети в рамках модели с учетом повторения заблокированных заявок. Для разработки расчетных процедур необходимо построить модель мультисервисной иерархической сети доступа с учетом повторных вызовов, а также точные и приближенные алгоритмы оценки их характеристик. Перечисленные задачи планирования и эксплуатации мультисервисных сетей доступа, а также анализ опубликованных работ приводят к следующим задачам исследования:

- Разработать семейство моделей мультисервисных иерархических сетей доступа, в которых учитываются условия обслуживания потоков трафика, порожденного современными коммуникационными приложениями. К ним относятся: иерархическая структура построения узлов и линий сети; зависимость требуемого ресурса и среднего времени обслуживания заявки от номера потока; возможность повторения заблокированной заявки.
- Для построенного семейства моделей мультисервисных иерархических сетей доступа разработать методы точной и приближенной оценки показателей качества совместного обслуживания заявок, пригодные для использования в заданной области изменения входных параметров.
- Показать возможности применения моделей и методов их расчета для решения практических задач, возникающих в процессе планирования и эксплуатации мультисервисных иерархических сетей доступа, в частности, для оценки значений скорости передачи линий сети, обеспечивающих заданные показатели обслуживания поступающих потоков заявок на передачу трафика сервисов реального времени.

## Раздел 2

# Построение и анализ мультисервисной иерархической сети доступа с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании

### 2.1. Введение

Для решения задач, сформулированных в качестве цели диссертационной работы, следует построить и исследовать математическую модель сети доступа, в которой учитываются: иерархический характер топологии сети, наличие произвольного количества потоков заявок на предоставление разного рода инфокоммуникационных сервисов с целью передачи трафика реального времени, зависимость требуемой скорости передачи информации от номера потока, возможность повторения заявки в случае неудачной попытки соединения. Математическое описание исследуемой модели выполнено в подразделе 2.2. Здесь сформулированы свойства иерархической сети, построены модели поведения абонента после получения отказа в обслуживании из-за недостатка ресурса передачи информации; приведено описание процессов поступления и обслуживания заявок на передачу трафика сервисов реального времени; построен марковский процесс, описывающий динамику изменения состояния числа заявок, находящихся на обслуживании, с изменением параметра времени; приведена система уравнений статистического равновесия, связывающая значения стационарных вероятностей модели. В подразделе 2.3 сформулированы определения вероятностных характеристик качества обслуживания поступающих заявок и получены соотношения между ними. В общем случае для вычисления характеристик используется имитационное моделирование. Основные моменты, относящиеся к построению имитационной модели анализируются в подразделе 2.4. Следующий подраздел посвящен численному анализу свойств характеристик



качества обслуживания поступающих заявок. Показаны результаты негативного воздействия повторных вызовов на процессы обслуживания заявок, а также исследована зависимость основных показателей качества обслуживания абонентов от параметров поведения абонента, получившего отказ в обслуживании из-за недостатка ресурса передачи информации. В подразделе 2.5 сформулированы выводы по результатам второго раздела.

## **2.2. Математическое описание модели иерархической сети доступа**

### **2.2.1. Структура и основные свойства иерархической сети доступа**

Потоки трафика, инициированные предоставлением разного рода инфокоммуникационных услуг, проходят стадии концентрации и затем уходят по транспортной сети в точку назначения. Пути прохождения и последовательной обработки возникающего трафика связаны между собой. Для описания этих связей используется понятие топологии. В теории телетрафика топология сети задается количеством узлов, числом соединительных линий между каждой парой узлов и некоторыми другими характеристиками [14,15,75,76,86]. Примеры нескольких популярных сетевых топологий показаны на рисунке 2.1.

В перечень часто используемых топологий телекоммуникационных сетей необходимо включить следующие топологии: полносвязная, кольцевая, звезда, треугольная, иерархическая, смешанная (все они показаны на рисунке 2.1.). В этот список следует также включить линейную топологию. Каждая из отмеченных структур обладает своими преимуществами и недостатками. Поэтому выбор топологии при планировании новых телекоммуникационных сетей следует проводить после предварительного анализа мест концентрации возникающего абонентского трафика, типа заказываемых инфокоммуникационных сервисов, стоимости аренды или строительства новых линии связи.

По мнению многих экспертов [14,15,75,76,86,113], полносвязные топологии

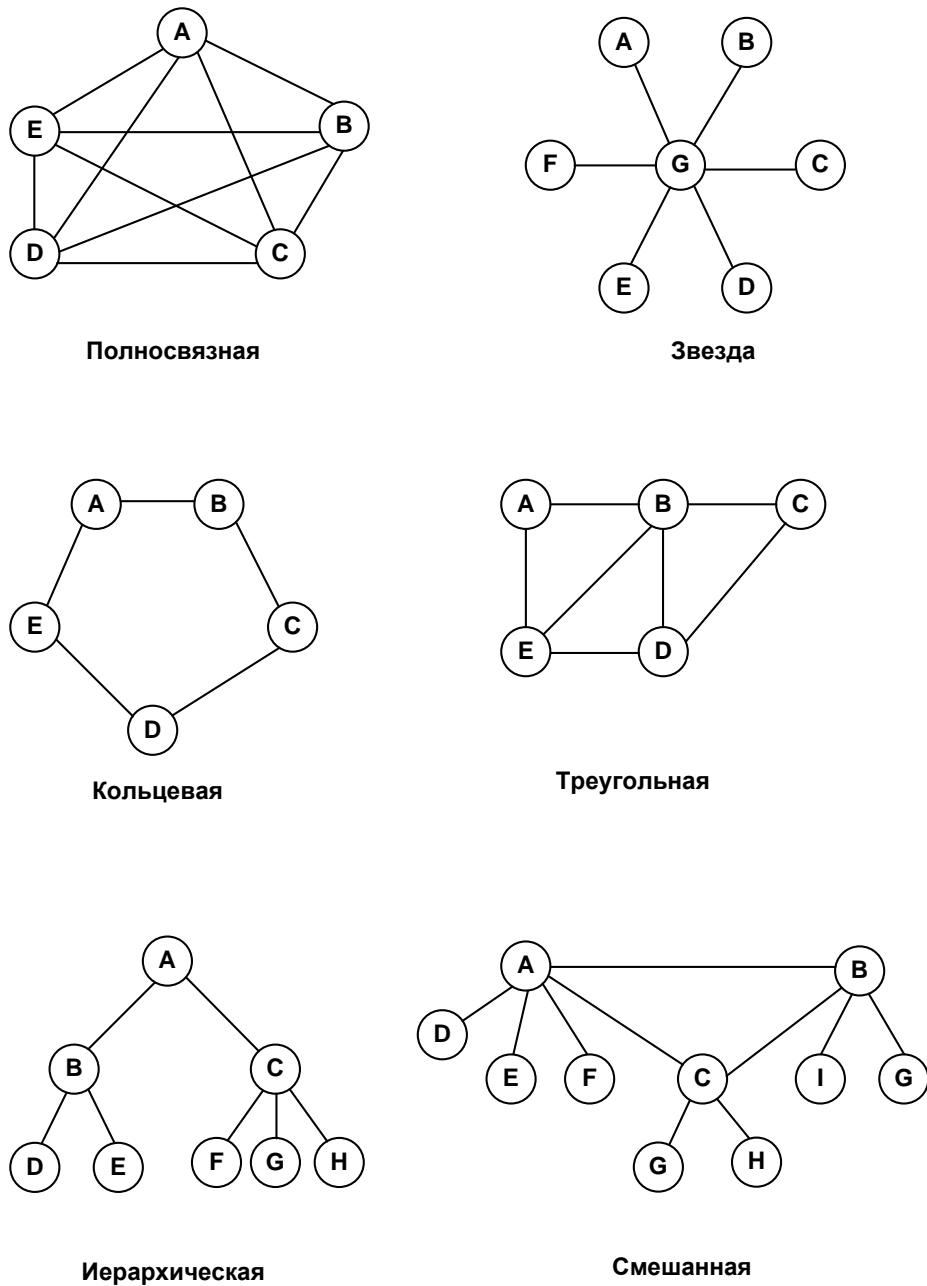


Рисунок 2.1 - Примеры часто используемых топологий телекоммуникационных сетей

используются при строительстве ядра транспортной сети. Здесь большое значение приобретают преимущества полностью связанных схем: малое время на установление соединения, простота управления сетью, большая устойчивость к сбоям и поломкам оборудования. Если речь идет о строительстве или расширении больших по размерам сетей, то здесь предпочтительней использовать иерархические топологии. Их преимущества заключаются в более простой по сравнению с другими топологиями организации процедуры расширения сети. Среди

недостатков иерархических архитектур — излишняя централизация сети и вытекающие отсюда проблемы надёжности при установлении соединения. Отмеченные преимущества являются определяющими при выборе иерархических топологий в качестве основы при планировании сетей доступа.

По мнению экспертов [78,86,110,115], стоимость сетей доступа в общей оценке стоимости сети связи примерно на порядок превосходит стоимость транспортного ядра сети. По этой причине процедура их планирования должна отличаться точностью. Использование избыточного ресурса передачи информации экономически нецелесообразно и ведет к сильному удорожанию проекта строительства сети. Сказанное означает, что при построении модели сети доступа необходимо учесть все особенности поступления заявок, влияющие на величину пропускной способности сети. К таким особенностям относятся повторные попытки соединения после получения отказа в первичной и повторных попытках. Процедура формирования входного потока заявок с учетом поведения абонента после отказа в обслуживании рассмотрена в следующем подразделе.

Как уже было сказано, сети доступа, имеющие иерархическую структуру, применяются в тех случаях, когда при транспортировке трафика необходимо реализовать возможности по концентрации возникающих информационных потоков. В математической теории графов подобные сети называются древовидными и имеют следующее определение: «древовидная топология — топология сети, в которой узлы и связи между ними образуют неориентированный ациклический граф, не содержащий замкнутых путей и позволяющий соединить единственным образом пару любых узлов». Пример топологии, обладающей перечисленными свойствами показан на рисунке 2.2 (см. также рисунок 1.2).

Далее, когда речь будет идти об иерархической сети доступа, будем предполагать, что рассматривается сеть с нумерацией соединительных линий и узлов, использованной на рисунке 2.2. Обозначим через  $J$  число соединительных линий иерархической сети. Узлы сети (в теории графов также могут использовать термин вершины) делятся на три категории в соответствии с порядком

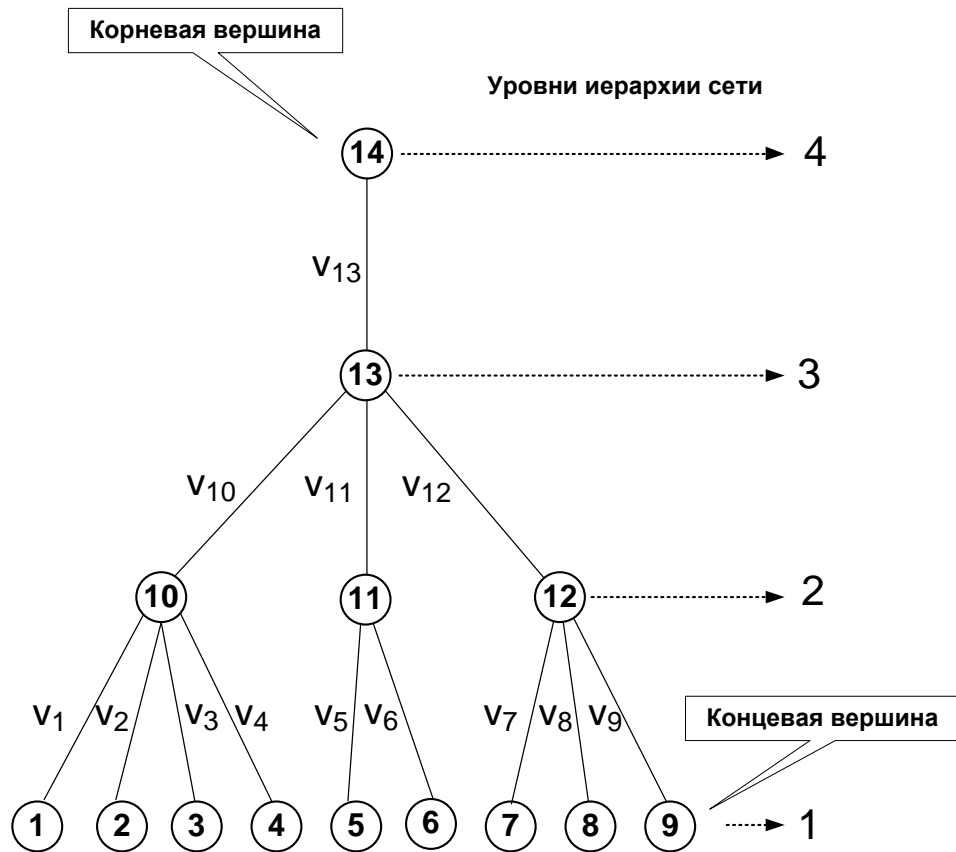


Рисунок. 2.2 - Пример иерархической сети доступа из 14 узлов и 13 соединительных линии

установления соединения с другими узлами. Выделено семейство концевых узлов, которые не имеют входящих линий и семейство корневых узлов, которые не имеют исходящих линий. Для рассматриваемой модели иерархической сети семейство корневых узлов состоит из одного элемента. Для примера сети, показанной на рисунке 2.2, в семейство концевых узлов входят узлы с номерами от единицы до девяти, а семейство корневых узлов состоит из узла с номером 14. Оставшиеся узлы сети имеют одну или несколько входящих линий и одну исходящую. На рисунке 2.2 это узлы сети с номерами от 10 до 13.

Сеть, принадлежащая анализируемому семейству, обладает следующими свойствами: количество узлов в сети на единицу больше чем  $J$ ; все маршруты передачи информации начинаются в одном из концевых узлов и заканчиваются в корневом узле. Введем понятие уровня иерархии, определив их количество через

значение максимального числа узлов в маршруте.

Сеть, представленная на рисунке 2.2, имеет четыре уровня иерархии. Она показывает топологию иерархической сети без привязки к потокам трафика, которые передаются по ее звеньям. Для описания процедуры расчета пропускной способности звеньев мультисервисной иерархической сети доступа, более целесообразно использовать схему сети, показанную на рисунке 2.3.

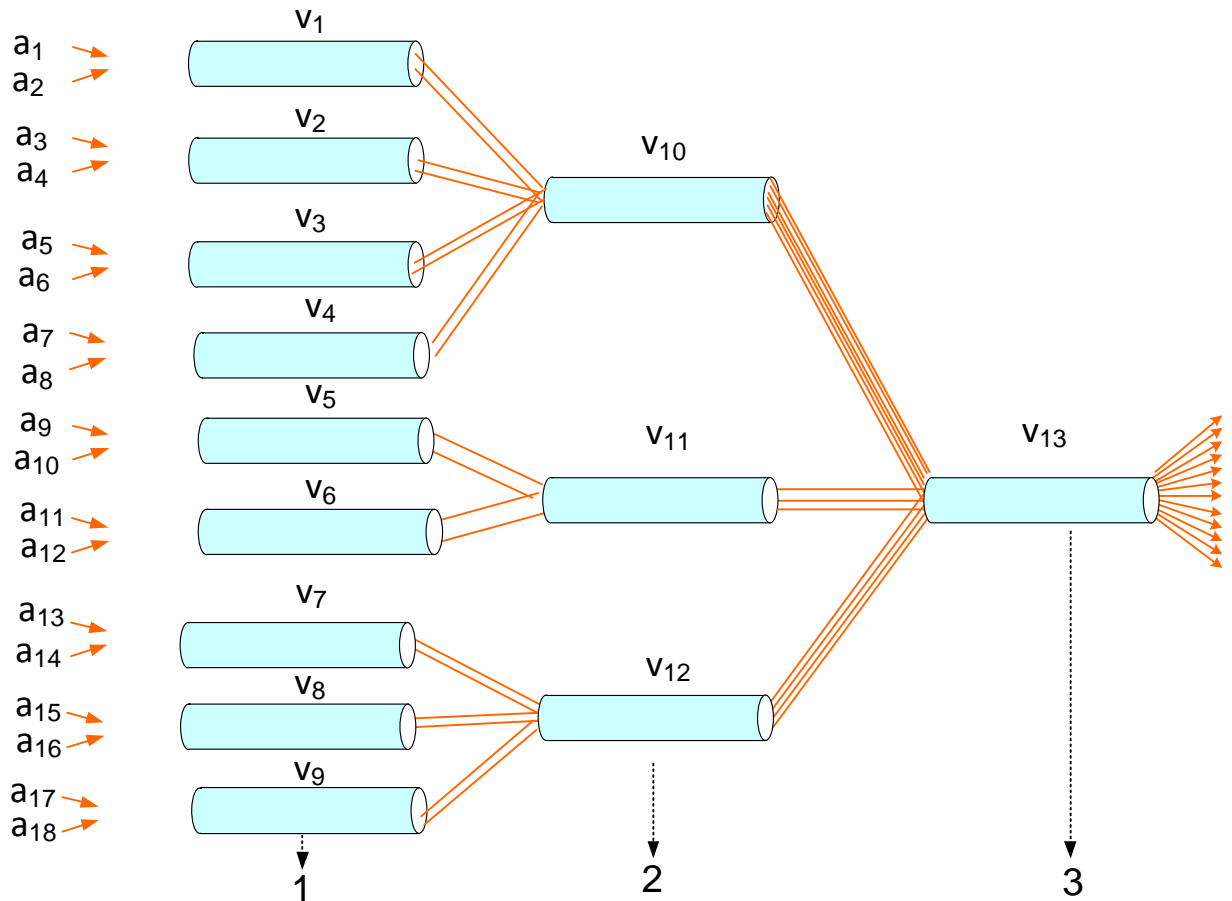


Рисунок 2.3 - Мультисервисная сеть доступа, имеющая топологию, представленную на рисунке 2.2

На приведенном рисунке отмечены маршруты следования 18 потоков заявок, на установление соединения и последующую передачу трафика сервисов реального времени. Для удобства изложения вычислительных процедур оценки доли потерянных заявок назовем соединительные линии сети, исходящие из узлов, находящихся на одном уровне иерархии, линиями одного этапа установления соединения. В рассматриваемом контексте номер этапа

установления соединения будет совпадать с номером уровня иерархии, рассматриваемых узлов сети. Обозначим через  $q$  число этапов установления соединения. Значение  $q$  будет на единицу меньше, чем число уровней иерархии. В частности, для сети, показанной в качестве примера на рисунке 2.3, выполняется соотношение  $q = 3$ .

### **2.2.2. Модель поведения абонента после получения отказа в обслуживании**

В действующих и перспективных системах связи пользователь инфокоммуникационных услуг имеет существенно больше возможностей, чем раньше, влиять своим поведением на характеристики формируемого потока заявок и, следовательно, на показатели качества обслуживания абонентов сети. Возрастающие возможности связаны с техническим совершенствованием абонентских терминалов и программных средств управления установлением соединения в сетях связи следующего поколения. Необходимо отметить, что в перспективных сетях связи клиентом сети, создающим информационную нагрузку, чаще будет не человек, а техническое устройство. К ним, например, относятся всевозможные датчики телеметрии, которые передают результаты съемки данных по сетям доступа в центры обработки информации. Если на каком-то участке соединительного тракта получен отказ, то анализируемое оконечное устройство в соответствии с заложенной программой повторяет попытку соединения и передачи снимаемой информации. Если в сети создаются условия для возникновения так называемых «узких мест», то тем самым создаются условия для лавинообразного роста потоков повторных вызовов. Интенсивность потока повторных обращений клиентов сети (в том числе и подключенных к ней автоматизированных устройств) может многократно превысить интенсивность потока первичных заявок. Такое состояние дел делает невозможным использование традиционных методик планирования пропускной

способности сетей связи, развитых на основе моделей с потерями или ожиданием. Численные результаты, иллюстрирующие возникающие погрешности в оценке объемов необходимой инфраструктуры, будут получены в завершающих подразделах данного раздела.

Для формализованного описания процесса образования повторного запроса и его поступления в систему связи с целью выделения необходимого объема ресурса передачи информации необходимо определить вероятность повторения заявки, зависящую от номера неудачной попытки соединения, и функцию распределения промежутка времени между последовательными запросами одного абонента [82-93]. Обозначим через  $H_1$  вероятность повторения вызова после первого отказа в обслуживании, а через  $H_2$  обозначим вероятность повторения вызова после второго и более отказов в обслуживании. Обычно выполняется неравенство  $H_2 > H_1$ . Для упрощения расчетов часто предполагается, что  $H_2 = H_1$ .

В общем случае значение  $H_s$  показывает вероятность повторения запроса после получения пользователем услуг связи  $s$  подряд отказов в обслуживании, включая отказ в первичной попытке соединения. Числовой ряд  $H_s$ ,  $s=1,2,\dots$ , называется функцией настойчивости абонента [89]. Значения  $H_s$  обычно лежат в интервале  $0,5 \dots 1$ . Измерение функции настойчивости абонента требует привлечения достаточно мощных средств вычислительной техники. Результаты численного анализа результатов измерения  $H_s$  довольно редки. Можно упомянуть данные, отмеченные в [89]. Как правило, значения  $H_s$  монотонно возрастают с ростом номера  $s$  неудачной попытки соединения. Принято выделять области с малой (в районе  $0,1 \dots 0,5$ ), средней (в районе  $0,5 \dots 0,7$ ) и большей (в районе  $0,7 \dots 0,95$ ) вероятности повторения заблокированной заявки.

Интервал времени от момента принятия клиентом решения о повторении запроса до его поступления в систему зависит от индивидуальной реакции клиента на отказ в обслуживании (время ожидания до начала формирования повторного запроса) и технических условий установления соединения (время

повторного установления соединения). Обычно при построении моделей с учетом эффекта повторных запросов предполагается, что интервал времени от получения отказа в обслуживании до поступления в сеть повторного запроса имеет экспоненциальное распределение. Обозначим параметр этого распределения через  $\gamma$ . Результаты численных исследований [89] показали, что характеристики качества обслуживания абонентов сети с заметным влиянием повторных вызовов, слабо зависят от функции распределения интервала времени между повторными запросами, если среднее значение этого интервала фиксировано.

### 2.2.3. Модель поступления и обслуживания вызовов

Будем предполагать, что первичные заявки на установление соединения и последующую передачу трафика сервисов реального времени поступают в соответствии с моделью пуассоновского потока. Выполнение этого предположения означает, что анализируемый поток получается в результате суперпозиции большого числа независимых стационарных потоков с малой интенсивностью поступления заявок в каждом потоке и суммарной интенсивностью результирующего потока, стремящейся к константе [12,13]. Это предположение можно считать выполненным на уровне доступа, где происходит смешивание большого числа возникающих потоков заявок на получение разного рода инфокоммуникационных сервисов. Обозначим через  $n$  общее число поступающих потоков заявок, а через  $\lambda_k$  обозначим интенсивность поступления заявок в  $k$ -ом потоке  $k=1,2,\dots,n$ . Для обслуживания заявки требуется предоставить скорость  $d_k$  бит в секунду в каждой из соединительных линий, составляющих маршрут движения трафика, относящегося к обслуживанию рассматриваемой заявки. Значение требуемой скорости передачи зависит от статистических свойств информационного потока, скорости линии и от результатов реализации процедуры мультиплексирования потока при использовании пакетных технологий передачи информации.



Используются два подхода к определению величины требуемой скорости передачи. В первом случае ограничиваются анализом статистических свойств возникающего информационного потока, которые определяются конкретным видом инфокоммуникационного приложения. Так например, при обслуживании речевого трафика в сетях фиксированной связи необходимо предоставить скорость 64 кбит/с. Учет статистического мультиплексирования информационных потоков на шкале времени, относящейся к поступлению пакетов, приводит к меньшему значению требуемой скорости передачи, которая называется эффективной скоростью передачи информационного потока. Ее величина определяется из разного рода эмпирических соотношений [110,146].

Приведем один из известных результатов. Величина эффективной скорости оценивается исходя из значений характеристик анализируемого потока трафика: средней  $w$  скорости потока, пиковой  $h$  скорости потока, скорости линии  $C$  и величины доли потерянных ячеек  $P_{loss}$ . Зададим вспомогательные характеристики  $x, y$  из соотношений  $x = -\frac{2h}{C} \log P_{loss}$ ,  $y = 1 - \frac{1}{50} \log P_{loss}$ . Тогда в соответствии с [117] эффективная скорость передачи  $d_{eff}$  находится из такого эмпирического выражения:

$$d_{eff} = \begin{cases} yw(1 + 3x(1 - \frac{w}{h})), & \text{если } 3x \leq \min(3, \frac{w}{h}), \\ yw(1 + 3x^2(1 - \frac{w}{h})), & \text{если } 3 < 3x^2 \leq \frac{w}{h}, \\ h & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2.1)$$

Для построения модели занятия ресурса необходимо ввести важное понятие единицы канального ресурса [123]. Занумеруем соединительные линии сети произвольным образом. Обозначим в  $j$ -ой линии через  $c_j$  скорость передачи информации. Обозначим через  $d$  наибольший общий делитель значений  $d_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  и  $c_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$ . Тогда в соответствии с определением значение  $d$  находится из следующего соотношения:

$$d = \text{НОД}(d_1, \dots, d_n, c_1, \dots, c_J).$$

Выполненные построения дают возможность описать процесс поступления и обслуживания заявок на передачу трафика реального времени с помощью случайного марковского процесса с конечным пространством состояний. Введем дополнительные обозначения. Величина

$$v_j = \frac{c_j}{d}, \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

представляет из себя целочисленное представление скорости  $j$ -ой линии, выраженное в единицах канального ресурса (единица канального ресурса имеет скорость  $d$  бит в секунду), а величина

$$b_k = \frac{d_k}{d}, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

представляет из себя целочисленное требование к скорости передачи информации, также выраженное в тех же единицах канального ресурса, необходимое для обслуживания заявки  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Этот объем канального ресурса занимает в течение промежутка времени передачи трафика сервиса реального времени, ассоциированного с обслуживанием заявки  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Будем предполагать, что это время имеет экспоненциальное распределение с параметром  $\mu_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Рассматриваемый объем ресурса в количестве  $b_k$  канальных единиц резервируется на все время обслуживания заявки, даже если исходя из особенностей анализируемого информационного потока, передача пользовательского трафика и не выполняется. Так, например, происходит во время пауз при передаче речевого трафика. После окончания обслуживания заявки весь объем канального ресурса освобождается и может быть использован для обслуживания других заявок.

Помимо потоков первичных заявок сеть доступа также обслуживает и потоки повторных запросов, образованные из-за отказов в процессе установления соединения из-за недостаточности канального ресурса хотя бы в одной из

соединительных линий маршрута движения трафика, относящегося к обслуживанию заявки. Обозначим через  $H_{k,1}$  вероятность повторения заявки в первичной попытке соединения, а через  $H_{k,2}$  обозначим вероятность повторения заявки в повторной попытке соединения. Повторная попытка от абонента, участвующего в формировании  $k$ -го потока заявок, поступает через случайное время, имеющее экспоненциальное распределение с параметром  $\gamma_k$ .

Обозначим через  $j_k$  число абонентов, формирующих  $k$ -й поток заявок, находящихся в случайный момент времени в состоянии повторения заявки. Тогда суммарная интенсивность  $k$ -го потока заявок будет определяться из выражения  $\lambda_k + j_k \gamma_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Будем предполагать, что повторная заявка обслуживается по тем же правилам, что и первичная заявка соответствующего потока. При проведении последующего теоретического анализа модели иерархической сети доступа будет предполагаться, что значение  $j_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  меняется от нуля до бесконечности. Это упростит вид отдельных алгебраических выражений, относящихся к определению характеристик качества обслуживания абонентов. При проведении вычислений с использованием численных методов линейной алгебры значения  $j_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  необходимо ограничить. Отображение процедуры формирования потоков повторных вызовов на модели сети, показанной на рисунке 2.2, приведено на рисунке 2.4.

#### 2.2.4. Маршрутная матрица

Для описания процесса движения трафика по сети используется так называемая маршрутная матрица. Введем соответствующее понятие [86]. Обозначим через  $R_k$  множество номеров линий анализируемой модели сети, каналный ресурс которых занимается в процессе обслуживания поступившей заявки  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ . Как уже было сказано первичная или повторная заявка  $k$ -го потока допускается к обслуживанию, если во всех соединительных

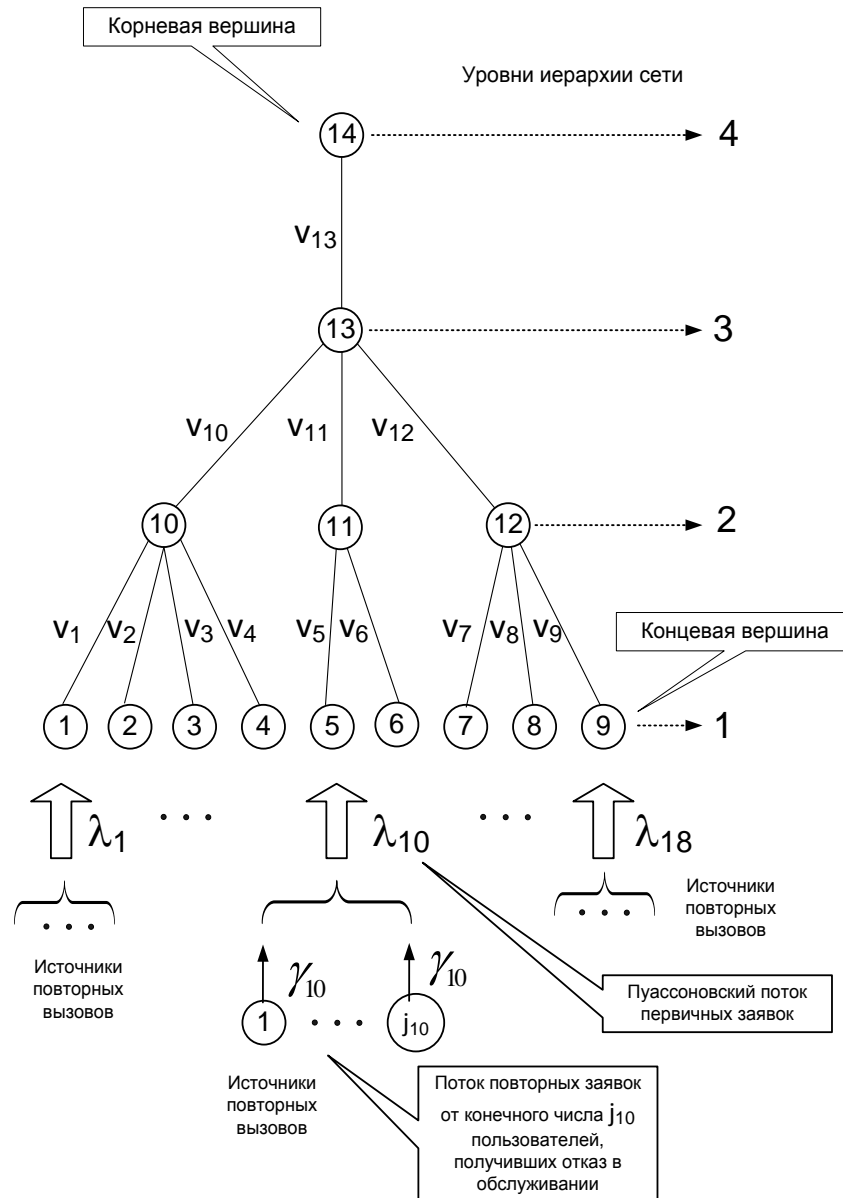


Рисунок 2.4 - Процедура формирования потоков повторных вызовов на модели сети, показанной на рисунке 2.2

линиях, перечисленных в множестве  $R_k$ , есть не менее  $b_k$  свободных единиц канального ресурса. Введем дополнительное множество  $N_j$ , куда включим номера потоков трафика, которые в процессе движения по сети проходят  $j$ -ю соединительную линию. Маршрутная матрица  $R$  определяется из следующего формального выражения

$$R = \| \|r_{j,k}\| \| = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & \cdots & n \\ \hline 1 & r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ 2 & r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ J & r_{J,1} & r_{J,2} & \cdots & r_{J,n} \end{array}.$$

В соотношении для  $R$  используются символы  $r_{j,k}$ ,  $j=1,2,\dots,J$ ;  $k=1,2,\dots,n$ , которые имеют следующий смысл

$$r_{j,k} = \begin{cases} b_k, & j\text{-я линия занимается на передачу трафика } k\text{-го потока;} \\ 0, & j\text{-я линия не занимается на передачу трафика } k\text{-го потока.} \end{cases}$$

Отличие от нуля элемента маршрутной матрицы  $r_{j,k}$  говорит о том, что  $j$ -е звено сети используется при передаче трафика, относящегося к обслуживанию первичной или повторной заявки  $k$ -го потока, при этом занимается  $b_k$  единиц канального ресурса. Ненулевые элементы  $j$ -й строки определяют множество  $N_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$ , а ненулевые элементы  $k$ -го столбца определяют множество  $R_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Приведем в качестве примера маршрутную матрицу для модели иерархической сети, показанной на рисунке 2.3

$$R = \begin{array}{c|cccccccccccccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ \hline 1 & b_1 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_7 & b_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_9 & b_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{13} & b_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{15} & b_{16} & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{17} & b_{18} \\ 10 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} \\ 13 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} \end{array}$$

### 2.2.5. Марковский процесс

Качество обслуживания поступающих заявок можно оценить, если известны значения доли времени пребывания модели сети в состоянии с известным числом заявок каждого типа, находящихся на обслуживании или в состоянии повторения вызова. Обозначим через  $i_k$  число заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , находящихся на обслуживании, а через  $j_k$  обозначим число абонентов, формирующих  $k$ -й поток информационной нагрузки и находящихся в состоянии повторения запроса на установление соединения,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Вектор состояния модели сети имеет вид

$$(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n).$$

Потоки трафика, циркулирующие в сети и имеющие доступ к  $j$ -й линии, не могут все вместе использовать больше  $v_j$  канальных единиц  $j$ -й соединительной линии. Из этого условия нетрудно установить границы пространства состояний исследуемой модели иерархической мультисервисной сети доступа. Обозначим пространство состояний символом  $S$ . Состояние  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  принадлежит пространству  $S$ , если выполняются очевидные неравенства

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

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

.....

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

Обозначим через  $i_k(t)$  число заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , находящихся на обслуживании в момент времени  $t$ , а через  $j_k(t)$  обозначим число абонентов, формирующих  $k$ -й поток информационной нагрузки и находящихся в момент времени  $t$  в состоянии повторения запроса на установление соединения,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Функционирование модели описывается марковским процессом

$$r(t) = (j_1(t), j_2(t), \dots, j_n(t), i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)),$$

определенном на бесконечном пространстве состояний  $S$ . Марковский характер

процесса  $r(t)$  следует из того обстоятельства, что интервалы времени между поступлениями первичных вызовов в систему, интервалы времени между последовательными поступлениями повторных вызовов от одного абонента и промежутки времени обслуживания заявок имеют экспоненциальное распределение и не зависят друг от друга.

### 2.2.6. Система уравнений равновесия

Будем предполагать, что для процесса  $r(t)$  существует стационарный режим. Для этого достаточно потребовать, чтобы выполнялось соотношение  $H_{k,2} < 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . В этой ситуации среднее число абонентов, повторяющих вызов будет ограничено. Этот результат получен в [89]. Случай, когда  $H_{k,2} = 1$  для каких-либо номеров  $k$ , не так интересен с практической точки зрения и дальше рассматриваться не будет. Обозначим через  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  стационарные предельные вероятности состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Вероятности  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  имеют интерпретацию доли времени пребывания исследуемой модели в состоянии  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  и могут использоваться для оценки характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Обозначим через  $U_k$  множество состояний исследуемой модели сети, когда поступившая заявка  $k$ -го потока получает отказ в обслуживании из-за нехватки свободного ресурса передачи информации хотя в одном из звеньев маршрута следования трафика, относящихся к обслуживанию  $k$ -го потока.

Приравняв интенсивности выхода из произвольного состояния модели к суммарной интенсивности попадания в него, получаем систему уравнений равновесия, связывающую значения  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$

$$\begin{aligned}
& P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \times \tag{2.2} \\
& \sum_{k=1}^n ((\lambda_k + j_k \gamma_k) I((j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S \setminus U_k) + \\
& + (\lambda_k H_{k,1} + j_k \gamma_k (1 - H_{k,2})) I((j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k) + \\
& + i_k \mu_k I(i_k > 0)) = \\
& = \sum_{k=1}^n P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k I(i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k I(i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k - 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \lambda_k H_{k,1} \times \\
& \times I((j_1, \dots, j_k - 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \in U_k) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k (1 - H_{k,2}) \times \\
& \times I((j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \in U_k) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \mu_k \times \\
& \times I((j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) \in S)
\end{aligned}$$

В (2.2) символ  $I(\cdot)$  — индикаторная функция, принимающая значение единица, если выполнено условие, сформулированное в скобках, и равное нулю, если условие, сформулированное в скобках, не выполняется. Для вероятностей  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  выполняется условие нормировки.

Полученную систему уравнений равновесия можно решить в некоторых частных случаях. Один из них будет рассмотрен в следующем разделе работы. Для решения системы уравнений равновесия используются стандартные численные методы из линейной алгебры.



## 2.2.7. Характеристики качества обслуживания заявок

Предположим, что значения  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  стационарных вероятностей исследуемой модели сети найдены. Сформулируем определения для основных характеристик качества обслуживания поступающих заявок  $k$ -го потока. В перечень характеристик, представляющих интерес с точки зрения практических приложений, входят следующие показатели:

$\pi_{k,1}$  - доля времени недоступности маршрута следования трафика  $k$ -го потока для обслуживания заявок  $k$ -го потока

$$\pi_{k,1} = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n);$$

$\pi_{k,2}$  - доля первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока

$$\pi_{k,2} = \frac{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)(\lambda_k + j_k \gamma_k)}{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)(\lambda_k + j_k \gamma_k)};$$

$m_k$  - среднее число канальных единиц, занятых в каждой линии маршрута следования трафика  $k$ -го потока, на обслуживание заявок  $k$ -го потока

$$m_k = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k;$$

$y_k$  - среднее число заявок  $k$ -го потока, находящихся на обслуживании

$$y_k = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) i_k;$$

$r_k$  - среднее число абонентов, формирующих  $k$ -й поток трафика и находящихся в состоянии повторения заявки

$$r_k = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) j_k;$$

$r_{k,b}$  - среднее число абонентов, формирующих  $k$ -ый поток трафика, находящихся в состоянии повторения заявки в момент недостаточности ресурса

передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока

$$r_{k,b} = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) j_k;$$

$\pi_{k,3}$  - доля повторных заявок в общем потоке поступающих заявок  $k$ -го потока

$$\pi_{k,3} = \frac{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) j_k \gamma_k}{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) (\lambda_k + j_k \gamma_k)};$$

$f_k$  - среднее число повторных вызовов  $k$ -го потока на один первичный вызов  $k$ -го потока

$$f_k = \frac{1}{\lambda_k} \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) j_k \gamma_k;$$

$Q_k$  - среднее число отказов первичных и повторных заявок  $k$ -го потока в единицу времени на одно установленное соединение для общего потока заявок  $k$ -го потока

$$Q_k = \frac{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) (\lambda_k + j_k \gamma_k)}{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) i_k};$$

$\pi_{k,4}$  - доля первичных и повторных заявок  $k$ -го потока прекративших попытку соединения и покинувших систему связи, не дождавшись начала обслуживания

$$\pi_{k,4} = \frac{1}{\lambda_k} \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \times (\lambda_k (1 - H_{k,1}) + j_k \gamma_k (1 - H_{k,2}));$$

$\Lambda_{k,b}$  - интенсивность первичных и повторных вызовов  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока

$$\Lambda_{k,b} = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) (\lambda_k + j_k \gamma_k);$$

$\Lambda_k$  - интенсивность первичных и повторных вызовов  $k$ -го потока

$$\Lambda_k = \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) (\lambda_k + j_k \gamma_k).$$

## 2.3. Свойства характеристик качества обслуживания заявок

### 2.3.1. Законы сохранения

Получим соотношения, связывающие введенные характеристики качества обслуживания поступающих первичных и повторных заявок. Для этого воспользуемся методами, развитыми в [89]. Соотношения, имеющие вид законов сохранения интенсивностей потоков первичных и повторных заявок, поступающих в сеть, получающих отказ и занимающих ресурс передачи для пересылки трафика, следуют из системы уравнений (2.2) после умножения ее последовательно на  $j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n$  и суммирования по всем состояниям  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ . После приведения подобных членов и использования обозначений, введенных в предыдущем подразделе, получаем  $2n$  соотношений следующего вида:

$$r_k \gamma_k = \lambda_k \pi_{k,1} H_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k H_{k,2}; \quad (2.3)$$

$$\lambda_k + r_k \gamma_k = \lambda_k \pi_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k + y_k \mu_k; \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Эти же соотношения могут быть получены из формулы Литтла. Действительно, по формуле Литтла значение среднего времени  $W$  пребывания заявки в системе связи или в некоторой ее части, величина  $\lambda$  интенсивности попадания заявок в систему связи или в некоторую ее часть и значение  $L$  среднего числа заявок, находящихся в системе связи или в некоторой ее части, связаны соотношением

$$W = \frac{L}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Рассмотрим процесс пребывания первичной или повторной заявки  $k$ -го потока на обслуживании. Среднее время обслуживания  $W$  определяется из соотношения  $W = 1 / \mu_k$ . Среднее число первичных или повторных заявок  $k$ -го потока, находящихся на обслуживании  $L$ , определяется из соотношения  $L = y_k$ . Интенсивность потока первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, попадающих на обслуживание  $\lambda$ , определяется из соотношения  $\lambda = \lambda_k (1 - \pi_{k,1}) + (r_k - r_{k,b}) \gamma_k$ .

Используя формулу Литтла (2.4) получаем равенство

$$\frac{1}{\mu_k} = \frac{y_k}{\lambda_k(1 - \pi_{k,1}) + (r_k - r_{k,b})\gamma_k}. \quad (2.5)$$

Откуда после несложных преобразований нетрудно установить справедливость второго из приведенных соотношений (2.3).

Рассмотрим процесс пребывания первичной или повторной заявки  $k$ -го потока в состоянии повторения заявки. Среднее время пребывания заявки  $k$ -го потока в состоянии ее повторения  $W$  определяется из соотношения  $W = 1/\gamma_k$ . Среднее число первичных или повторных заявок  $k$ -го потока, находящихся в состоянии ее повторения, определяется из соотношения  $L = r_k$ . Интенсивность потока первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, попадающих в состояние ее повторения  $\lambda$ , определяется из соотношения  $\lambda = \lambda_k \pi_{k,1} H_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k H_{k,2}$ . Используя формулу Литтла (2.4), получаем равенство

$$\frac{1}{\gamma_k} = \frac{r_k}{\lambda_k \pi_{k,1} H_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k H_{k,2}}. \quad (2.6)$$

Откуда после несложных преобразований нетрудно установить справедливость первого из приведенных соотношений (2.3).

### 2.3.2. Соотношения между характеристиками

Основная область использования выражений (2.3) — это установление соотношений между введенными в подразделе 2.2.7 характеристиками качества обслуживания поступающих первичных и повторных заявок. Обычно при исследовании моделей с повторными вызовами оценивается только часть характеристик из большого семейства имеющих показатели качества обслуживания поступающих заявок, а оставшиеся находятся из специальным образом полученных соотношений. Назовем эти характеристики базовыми. В их число включены характеристики, которые нетрудно определить, не разделяя

первичные и повторные вызовы. Возьмем в качестве таковых значения  $\pi_{k,1}$  доли времени недоступности маршрута следования трафика  $k$ -го потока для обслуживания заявок  $k$ -го потока и  $\pi_{k,2}$  доли первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока. После несложных преобразований (2.3) и использования определений характеристик получаем такие результаты:

$$f_k = \frac{\pi_{k,2}H_{k,2} + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2})}{1 - \pi_{k,2}H_{k,2}}; \quad (2.7)$$

$$y_k = \frac{\lambda_k(1 - \pi_{k,2})(1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}{(1 - \pi_{k,2}H_{k,2})\mu_k};$$

$$r_k = \frac{\lambda_k(\pi_{k,2}H_{k,2} + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}{(1 - \pi_{k,2}H_{k,2})\gamma_k};$$

$$Q_k = \frac{\pi_{k,2}}{1 - \pi_{k,2}};$$

$$\pi_{k,4} = \frac{\pi_{k,2}(1 - H_{k,2}) - (1 - \pi_{k,2})\pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2})}{1 - \pi_{k,2}H_{k,2}};$$

$$\pi_{k,3} = \frac{\pi_{k,2}H_{k,2} + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2})}{1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2})};$$

$$m_k = \frac{\lambda_k b_k(1 - \pi_{k,2})(1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}{(1 - \pi_{k,2}H_{k,2})\mu_k};$$

$$\Lambda_k = \frac{\lambda_k(1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}{1 - \pi_{k,2}H_{k,2}};$$

$$\Lambda_{k,b} = \frac{\lambda_k \pi_{k,2}(1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}{1 - \pi_{k,2}H_{k,2}}.$$

Когда выполняется соотношение  $H_{k,1} = H_{k,2} = H_k$ , то вид приведенных соотношений упрощается. Они, в частности, уже не зависят от величины  $\pi_{k,1}$  доли

времени недоступности маршрута следования трафика  $k$ -го потока. Приведем соответствующие выражения

$$f_k = \frac{\pi_{k,2} H_k}{1 - \pi_{k,2} H_k}; \quad y_k = \frac{\lambda_k (1 - \pi_{k,2})}{(1 - \pi_{k,2} H_k) \mu_k}; \quad (2.8)$$

$$r_k = \frac{\lambda_k \pi_{k,2} H_k}{(1 - \pi_{k,2} H_k) \gamma_k}; \quad Q_k = \frac{\pi_{k,2}}{1 - \pi_{k,2}};$$

$$\pi_{k,4} = \frac{\pi_{k,2} (1 - H_k)}{1 - \pi_{k,2} H_k}; \quad \pi_{k,3} = \pi_{k,2} H_k;$$

$$m_k = \frac{\lambda_k b_k (1 - \pi_{k,2})}{(1 - \pi_{k,2} H_k) \mu_k}; \quad \Lambda_k = \frac{\lambda_k}{1 - \pi_{k,2} H_k};$$

$$\Lambda_{k,b} = \frac{\lambda_k \pi_{k,2}}{1 - \pi_{k,2} H_k}.$$

Полученные в этом и предыдущем подразделах соотношения можно использовать для оценки тех параметров и характеристик модели, измерение которых стандартными средствами затруднено из-за необходимости отделения первичных и повторных вызовов. Приведем формулу для вычисления интенсивности первичных заявок. Она следует из (2.7) и имеет вид

$$\lambda_k = \frac{y_k \mu_k (1 - \pi_{k,2} H_{k,2})}{(1 - \pi_{k,2})(1 + \pi_{k,1}(H_{k,1} - H_{k,2}))}. \quad (2.9)$$

Если справедливо равенство  $H_{k,1} = H_{k,2} = H_k$ , то вид расчетной формулы упрощается

$$\lambda_k = \frac{y_k \mu_k (1 - \pi_{k,2} H_k)}{1 - \pi_{k,2}}. \quad (2.10)$$

## 2.4. Частные случаи

Оценка характеристик качества обслуживания, введенных в предыдущем подразделе, выполняется с помощью решения системы уравнений равновесия (2.2).

Это обычная система линейных уравнений с числом неизвестных, равным числу состояний в исследуемой модели иерархической сети доступа. Для применения стандартных алгоритмов линейной алгебры и последующего использования средств вычислительной техники необходимо ограничить число состояний в исследуемом марковском процессе. С этой целью число абонентов, которые могут одновременно повторять вызов, ограничивается неким целым числом. Подбор ограничения происходит опытным путем на основе анализа результатов вычислений. Общее число состояний становится конечным, но все равно очень большим. Из-за этого решить систему уравнений равновесия можно только для частных случаев исследуемой модели. Один из таких случаев будет рассмотрен в следующем разделе диссертационного исследования в подразделе 3.2. Там будет исследована иерархическая сеть доступа, состоящая из двухзвенных маршрутов с произвольным числом входных потоков мультисервисной нагрузки. Для оценки вероятностных характеристик модели предлагается использовать метод, основанный на решении системы уравнений равновесия итерационным алгоритмом Гаусса-Зейделя. Для эффективной реализации расчетной процедуры система уравнений равновесия приводится к специальному виду.

Другим важным частным случаем является модель иерархической мультисервисной сети без учета влияния повторения заблокированных заявок. Она получается из исследуемой модели иерархической мультисервисной сети доступа, если для всех  $k = 1, 2, \dots, n$  положить вероятности  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0$ . Особенностью данного частного случая является возможность оценки характеристик обслуживания заявок алгоритмом свертки. Этот алгоритм может быть реализован для любых значений структурных параметров модели. Он будет рассмотрен в следующем разделе диссертационного исследования.

Перечисленные частные случаи имеют самостоятельное значение при оценке характеристик качества обслуживания иерархических мультисервисных сетей связи. Модель, рассмотренная в подразделе 3.3, будет также использоваться при разработке приближенных алгоритмов расчета исследуемой иерархической мультисервисной сети с учетом влияния повторения заблокированных заявок.

## 2.5. Имитационная модель

В общем случае получить значения вероятностных характеристик можно только с использованием техники имитационного моделирования. В принципе, процесс поступления и обслуживания заявок в исследуемой модели сети не так сложен. Интервалы времени между последовательными поступлениями первичных заявок, повторных запросов от абонентов, получивших отказ в обслуживании, и интервалы времени занятия ресурса сети на передачу трафика реального времени, имеют экспоненциальное распределение и не зависят друг от друга. Процедура занятия ресурса полностью определяется маршрутной матрицей. Для построения имитационной модели применяются два подхода: можно воспользоваться стандартными пакетами программ, например, NS-3 или написать программу на одном из алгоритмических языков программирования (C+, Basic и т.п.), в которых имеются достаточно надежные датчики равномерно распределенных случайных чисел. Второй из сформулированных подходов целесообразно применять в ситуации, когда объем имитационного моделирования не так велик и оно используется в основном для анализа численных свойств характеристик и оценке точности приближенных алгоритмов расчета исследуемой модели сети. Этот подход будет использоваться в данном подразделе.

Для вычисления значений псевдослучайной величины  $s$ , имеющей экспоненциальное распределение с параметром  $a$ , используется выражение  $s = -\ln U / a$ , где  $U$  – значение псевдослучайной величины, имеющей равномерное распределение в интервале  $(0,1)$ , полученное с использованием датчиков, встроенных в языки программирования. Для оценки характеристик качества обслуживания поступающих заявок используются значения счетчиков, происходящих в модели событий, например, для оценки доли потерянных первичных и повторных вызовов необходимо проанализировать судьбу фиксированного числа  $l$  поступивших первичных и повторных заявок. Подсчитывается какая часть из  $l$  поступивших заявок получила отказ и это значение берется в качестве оценки искомой характеристики. Соответствующую



статистику рекомендуется собирать только в моменты изменения состояний модели. Данный подход называется дискретно-событийным моделированием. Это значительно ускоряет реализацию программы моделирования.

Точность оценки характеристик зависит от числа экспериментов в данном случае от числа поступивших заявок. Методами математической статистики находятся границы доверительного интервала, где с заданной точностью присутствует точное значение оцениваемой характеристики. Для вычисления границ используют следующий подход [86]. Число поступивших заявок делят на отдельные группы. Для каждой группы находят среднее значение рассчитываемой характеристики. Обозначим оцениваемый показатель работы сети через  $W$ , число групп обозначим через  $n$ , а среднее значение характеристики, рассчитанное для  $i$ -ой группы, обозначим как  $W_i$ . Для оценки границ доверительного интервала используют выборочное среднее

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (2.11)$$

и выбранную дисперсию

$$S_{\bar{W}}^2 = \frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2. \quad (2.12)$$

Если случайные величины  $W_i$  независимы, одинаково распределены и имеют нормальное распределение с неизвестным средним  $W$  и дисперсией  $\sigma^2$ , то справедливо выражение

$$\frac{\bar{W} - W}{S_{\bar{W}} / \sqrt{n}} \sim t(n-1), \quad (2.13)$$

где  $t(n-1)$  — распределение Стьюдента с  $(n-1)$ -й степенью свободы ( $n = 25 \dots 30$ ). Из результатов математической статистики следует, что с вероятностью  $1 - \mu$  значение  $W$  принадлежит интервалу

$$\bar{W} \pm t_{\mu, n-1} \frac{S_{\bar{W}}}{\sqrt{n}}. \quad (2.14)$$

Для значения параметра  $1 - \mu = 95\%$  и при выборке объема 25-30 значение квантили  $t_{\mu, n-1}$  примерно равно 2. Это предположение использовалось при

проведении последующих вычислений представленных в диссертации. В каждой группе было примерно 200...300 тысяч поступивших первичных заявок. Число групп 25-30, время счета для моделей сетей с несколькими десятками узлов менялось в интервале от 10 минут до часа.

## 2.6. Численный анализ характеристик модели

Построим имитационную модель анализируемой иерархической сети доступа с учетом поведения пользователя и исследуем влияние параметров модели на значения характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Целью исследования будет анализ влияния поведения абонента, получившего отказ в обслуживании, на процесс работы системы связи, а также формулировка и обоснование допущений, которые можно будет использовать для построения приближенных алгоритмов расчета характеристик.

Для проведения численных исследований рассмотрим модель иерархической сети доступа, представленную на рисунке 2.2 и рисунке 2.3. Если это не оговаривается особо, то значения фиксированных параметров модели определяются из соотношений:  $n = 18$ ,  $v_1 = 20$  к.е.,  $v_2 = 30$  к.е.,  $v_3 = 40$  к.е.,  $v_4 = 50$  к.е.,  $v_5 = 20$  к.е.,  $v_6 = 30$  к.е.,  $v_7 = 20$  к.е.,  $v_8 = 30$  к.е.,  $v_9 = 40$  к.е.,  $v_{10} = 20$  к.е.,  $v_{11} = 30$  к.е.,  $v_{12} = 20$  к.е.,  $v_{13} = 20$  к.е. Будем считать, что для всех потоков выполняется соотношение  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0,9$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$  и параметр экспоненциально распределенного времени обслуживания одинаков для всех потоков и определяется из равенства  $\mu_k = 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ . На каждую линию первого уровня доступа поступают два потока заявок. Один поток заявок — на передачу трафика с малыми потребностями в ресурсе (для обслуживания соответствующей заявки требуется одна единица ресурса). Другой поток заявок на передачу трафика с большими потребностями в ресурсе (для обслуживания соответствующей заявки требуется более одной  $b > 1$  единиц канального ресурса).

Определим фиксированные значения интенсивностей поступления

первичных заявок из соотношений:  $\lambda_1 = 10$ ;  $\lambda_2 = 0,5$ ;  $\lambda_3 = 15$ ;  $\lambda_4 = 0,75$ ;  $\lambda_5 = 20$ ;  $\lambda_6 = 1$ ;  $\lambda_7 = 25$ ;  $\lambda_8 = 1,25$ ;  $\lambda_9 = 10$ ;  $\lambda_{10} = 0,5$ ;  $\lambda_{11} = 15$ ;  $\lambda_{12} = 0,75$ ;  $\lambda_{14} = 0,5$ ;  $\lambda_{13} = 10$ ;  $\lambda_{15} = 15$ ;  $\lambda_{16} = 0,75$ ;  $\lambda_{17} = 20$ ;  $\lambda_{18} = 1$ . Поскольку для всех потоков среднее время обслуживания заявки выбрано за единицу, то интенсивности поступления заявок выражены в эрлангах, т.е. в значениях среднего числа потенциальных соединений анализируемого потока. Будем предполагать, что параметр экспоненциально распределенного времени до поступления повторной заявки одинаков для всех потоков и определяется из равенства  $\gamma_k = 10$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ . Ограничение  $n_k$  на максимально возможное число абонентов, которые одновременно повторяют заявку на установление соединения, зависит от интенсивности потока поступающих заявок и от величины вероятности повторения заявки в повторной попытке соединения. В данном подразделе величину данного ограничения выберем из соотношения  $n_k = 30$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ .

Маршрутная матрица  $R$  исследуемой модели сети выглядит следующим образом:

$$R = \begin{array}{c|cccccccccccccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ \hline 1 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b \\ 10 & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 1 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b & 1 & b & 1 & b \\ 13 & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b & 1 & b \end{array}.$$

Вначале исследуем зависимость  $\pi_{k,2}$  доли первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока, от степени

неоднородности требований к ресурсу передачи информации. Напомним формальное определение анализируемой характеристики

$$\pi_{k,2} = \frac{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)(\lambda_k + j_k \gamma_k)}{\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)(\lambda_k + j_k \gamma_k)}.$$

Вероятность повторения заявки примем равной нулю, т.е.  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ . Будем предполагать, что значение  $b$  потребности в ресурсе передачи информации ресурсоёмкого трафика меняется от одной до десяти канальных единиц. При этом для ресурсоёмкого трафика интенсивность предложенной нагрузки, выраженная в канальных единицах, не меняется и равна половине от канального ресурса линии доступа первого уровня. Таким образом, выполняются соотношения:

$$b\lambda_{2k} = \frac{\nu_k}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, 8$$

Результаты расчетов  $\pi_{k,2}$  для  $k = 1, 2, \dots, 8$  представлены на рисунке 2.5. На рисунке 2.6 показаны данные вычисления  $\pi_{k,2}$  для  $k = 9, 10, \dots, 12$  и на рисунке 2.7 представлены результаты расчетов  $\pi_{k,2}$  для  $k = 13, 14, \dots, 18$ . Для оценки характеристики использовалось имитационное моделирование. Всего было

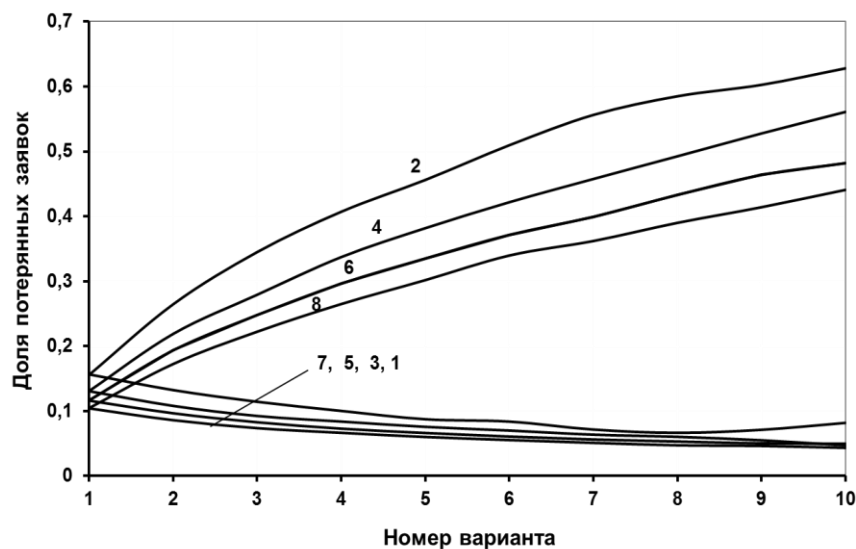


Рисунок 2.5 - Зависимость доли потерянных заявок 1 - 8 потоков от степени неоднородности требований к ресурсу передачи информации

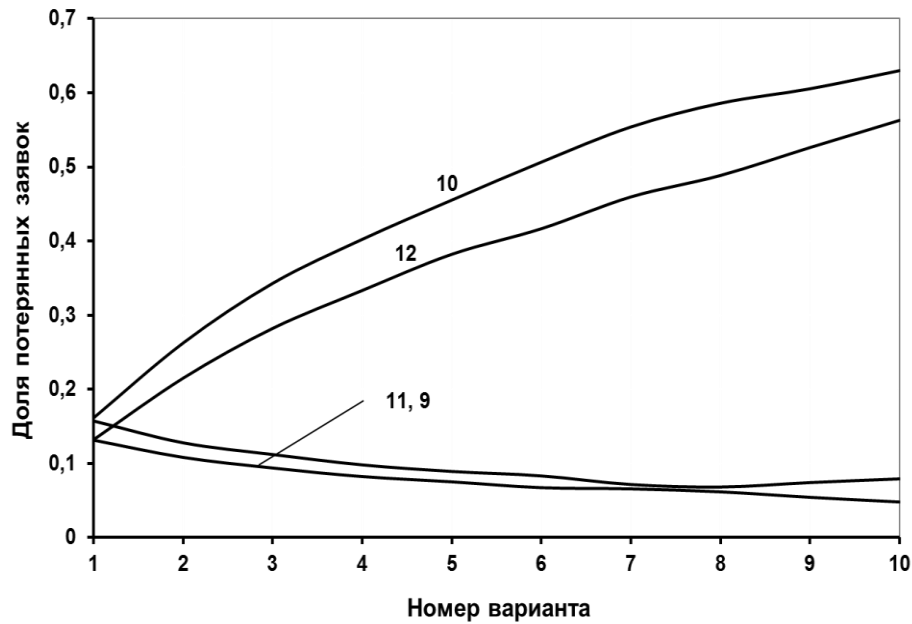


Рисунок 2.6 - Зависимость доли потерянных заявок 11 - 12 потоков от степени неоднородности требований к ресурсу передачи информации

выполнено 10 вариантов расчета характеристик для  $b = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ . Номер варианта, указанный на рисунках, соответствует значению  $b$ . При расчете каждого варианта использовался результат усреднения оценок характеристик, полученный для 20 групп по 200 000 поступлений первичных заявок. Относительная погрешность вычисления характеристик лежит в пределах 3-10 процентов. Цифра указывает на номер потока.

Результаты вычислений показывают, что с ростом неоднородности требований к ресурсу передачи растут потери заявок на передачу ресурсоёмкого трафика. Отметим, что при  $b = 1$  оба вида трафика испытывают одинаковые потери. Этот результат, представленный на рисунках, косвенно подтверждает заявленную точность имитационного моделирования.

Теперь исследуем влияние поведения абонента после отказа в обслуживании на значения характеристик обслуживания заявок. Рассмотрим модель, использованную при проведении вычислений на рисунках 2.5-2.7, и предположим, что параметры поведения абонента задаются из соотношений:

$H_{k,1} = H_{k,2} = 0,9; \gamma_k = 10, k = 1, 2, \dots, 18$ . На рисунке 2.8 показана зависимость доли

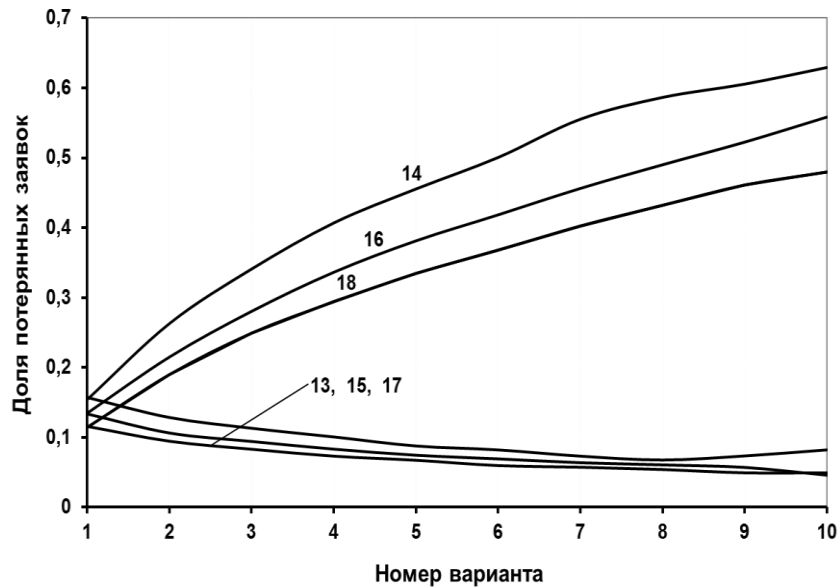


Рисунок 2.7 - Зависимость доли потерянных первичных и повторных заявок 13-18 потоков от степени неоднородности требований к ресурсу передачи информации

потерь первичных и повторных заявок для 1-го и 2-го потоков, а на рисунке 2.9 эти же зависимости показаны для 7-го и 8-го потоков. Для сравнения на этих же рисунках пунктиром приведены значения потерь без учета влияния повторения заявки, т.е. для случая  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ . Из представленных данных видно, что учет влияния поведения абонента, после отказа в обслуживании, существенно увеличивает значения потерь заявок. Это влияние усиливается с увеличением  $b$  неоднородности требований к ресурсу передачи, и уменьшением числа каналов в соединительной линии.

Теперь исследуем влияние интенсивности повторения заявки на значения характеристик обслуживания заявок. Рассмотрим модель, использованную при проведении вычислений на рисунках 2.5-2.9, и предположим, что параметры поведения абонента задаются из соотношений:  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0,7$ ;  $\gamma_k = \gamma$ ,  $k = 1, 2, \dots, 18$ , а  $\gamma = 1, 2, \dots, 10$ . На рисунке 2.10 показана зависимость доли потерь первичных и повторных заявок для 1-8 потоков от изменения  $\gamma$  в указанных пределах. Из представленных видно, что величина  $\pi_{k,2}$  слабо зависит

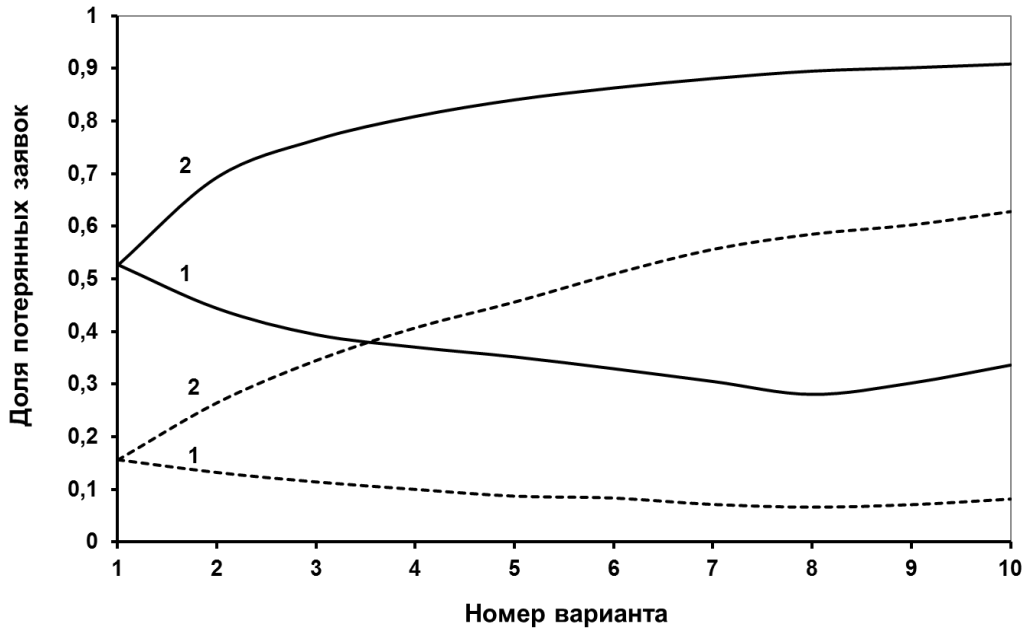


Рисунок 2.8 - Зависимость доли потерянных первичных и повторных заявок 1-го и 2-го потоков от  $b$  и параметров поведения абонента

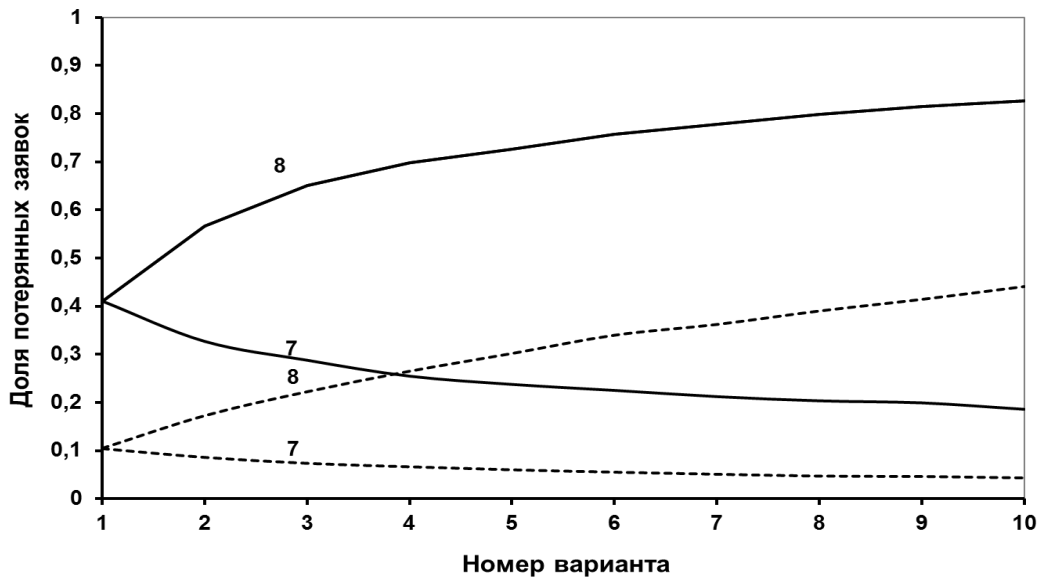


Рисунок 2.9 - Зависимость доли потерянных первичных и повторных заявок 7-го и 8-го потоков от  $b$  и параметров поведения абонента

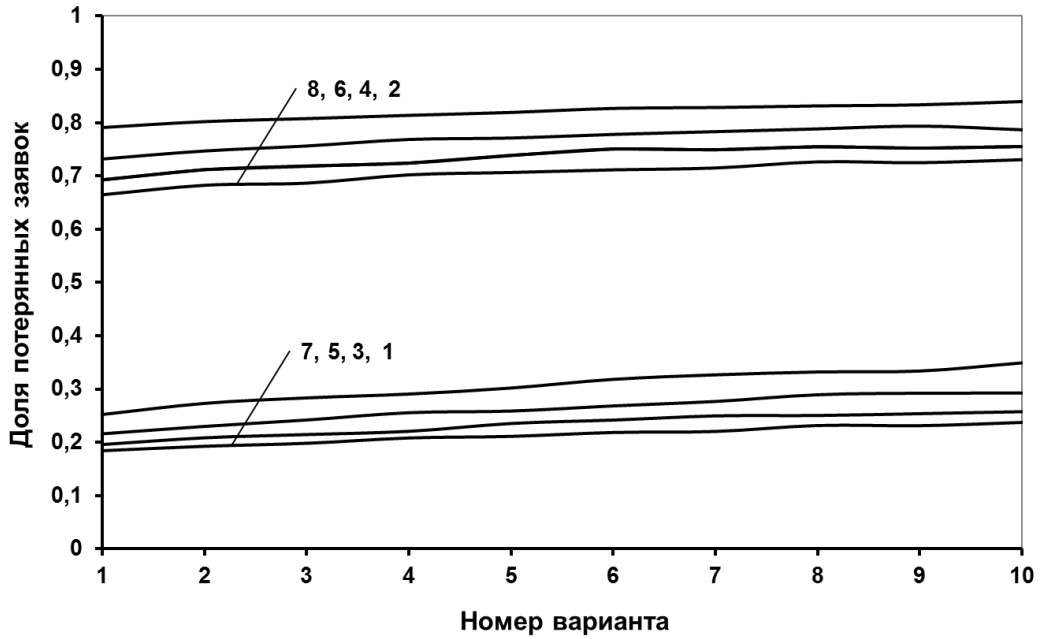


Рисунок 2.10 - Зависимость доли потерянных первичных и повторных заявок 1-8 потоков от  $\gamma$

от изменения  $\gamma$ . Это свойство можно взять за основу при построении приближенного алгоритма оценки характеристик. Этот результат будет получен в 4-ом разделе диссертации.

## 2.7. Выводы

1. Построена модель иерархической мультисервисной сети доступа, в которой учитывается влияние поведения абонента, получившего отказ в обслуживании из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика. В модели предполагается, что в этой ситуации абонент с вероятностью, зависящей от номера неудачной попытки соединения повторяет вызов через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение. Интенсивность поступления первичных заявок, требование к ресурсу передачи информации, среднее время обслуживания, вероятность и



интенсивность повторения вызова зависят от вида заказываемого сервиса. Построенная модель может быть использована для оценки достаточности ресурса в звеньях иерархической сети доступа при совместном обслуживании мультисервисного трафика коммуникационных приложений реального времени и учете влияния поведения абонента на процесс формирования входного потока.

2. С помощью разработанной модели даны формальные определения для показателей качества обслуживания абонентов. Путем преобразования системы уравнений равновесия установлены соотношения между введенными характеристиками, которые могут быть использованы для их косвенной оценки в ситуации, когда есть трудности в разделении первичных и повторных вызовов.

3. Исследованы возможности точной оценки значений характеристик. В общем случае рекомендуется использовать имитационное моделирование, в частных случаях, когда отсутствуют повторные заявки или рассматривается только одно звено сети значения характеристик могут быть получены соответственно методом свертки или в результате решения системы уравнений равновесия численным методом. Сформулированы основные этапы построения имитационной модели иерархической сети доступа.

4. Проведено численное исследование свойств характеристик модели. Результаты вычислений показывают, что учет влияния поведения абонента, после отказа в обслуживании, существенно увеличивает значения потерь заявок. Это влияние усиливается с увеличением неоднородности требований к ресурсу передачи, и уменьшением числа каналов в соединительной линии. Также установлено, что значения характеристик модели слабо зависят изменения интенсивности повторения заявок. Это свойство позволяет использовать для приближенной оценки характеристик их предельные значения, полученные при стремлении интенсивности повторения к нулю.

## Раздел 3

# Алгоритмы оценки характеристик мультисервисной иерархической сети доступа с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании

### 3.1. Введение

Для оценки характеристик мультисервисной иерархической сети с учетом влияния поведения пользователя на отказ в обслуживании можно использовать алгоритмы, основанные на имитационном моделировании, или на применении аналитических методов. Имитационная модель была построена в предыдущем разделе и использовалась для численного анализа свойств характеристик в зависимости от изменения входных параметров. Аналитические методы применимы при исследовании частных случаев модели. Эти случаи представляют самостоятельный интерес и могут использоваться для расчета характеристик сети доступа в практических приложениях. Также они могут применяться при разработке приближенных методов численного анализа исходной модели. В данном разделе будут рассмотрены два таких частных случая. В первом — вероятность повторения заблокированного запроса для всех поступающих потоков заявок равна нулю. Эта модель будет исследована в подразделе 3.2. Во втором случае в сети имеется только два этапа установления соединения и для каждого потока вероятность повторения заблокированного запроса может быть отлична от нуля. Эта модель будет исследована в подразделе 3.3. В подразделе 3.4 сформулированы выводы по результатам третьего раздела.

## 3.2. Оценка характеристик иерархической сети

### 3.2.1. Математическое описание модели

Поскольку данная модель является частным случаем исследуемой модели иерархической сети с учетом влияния повторных вызовов, то в ней сохраняются все те предположения о структуре сети, характере поступления и обслуживания первичных заявок, которые были сформулированы в подразделах 2.2.1-2.2.4. Структура модели, схема поступления и обслуживания информационных потоков показаны на рисунках 2.2 и 2.3. В силу более простого способа формирования входных потоков заявок математическое описание модели упрощается. Этот результат позволяет построить рекурсивный алгоритм оценки характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Приведем основные результаты, которые необходимы для изложения этапов реализации расчетного алгоритма.

Качество обслуживания поступающих заявок можно оценить, если известны значения доли времени пребывания модели сети в состояниях с известным числом заявок каждого типа, находящихся на обслуживании. Обозначим через  $i_k$  число заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , находящихся на обслуживании. Вектор состояния модели сети имеет вид  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Информационные потоки, имеющие доступ к  $j$ -й линии, не могут использовать в совокупности более, чем  $v_j$  канальных единиц  $j$ -й соединительной линии. Отсюда следуют границы пространства состояний  $S$  исследуемой модели. Состояние  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  принадлежит множеству  $S$ , если справедливы соотношения

$$\sum_{k \in N_j} i_k b_k \leq v_j, \quad j = 1, 2, \dots, J.$$

Как и раньше, обозначим через  $U_k$  множество состояний  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ , в каждом из которых поступившая заявка  $k$ -го потока получает отказ из-за недостаточности ресурса передачи в каком-то из звеньев  $k$ -го маршрута. Все состояния, входящие во множество  $U_k$  формируются из состояний  $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ ,

дополнительно удовлетворяющих условию

$$(i_1, \dots, i_{k-1}, i_k + 1, i_{k+1}, \dots, i_n) \notin S. \quad (3.1)$$

Введем компоненты марковского процесса  $r(t)$  описывающего динамику изменения состояний модели во времени. Пусть  $i_k(t)$  — число заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , находящихся на обслуживании в момент времени  $t$ . Изменение состояний модели описывается марковским процессом  $r(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t))$ , определенном на конечном пространстве состояний  $S$ .

### 3.2.2. Основные показатели качества обслуживания заявок

Обозначим через  $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$  значение стационарной вероятности состояния  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Поскольку анализируемая модель не учитывает влияние повторных запросов, то это резко уменьшает число показателей, используемых для оценки достаточности пропускной способности звеньев сети и качества обслуживания поступающих заявок. Для каждого потока их будет всего два: доля потерянных заявок и среднее число занятых единиц канального ресурса. Сохраним для этих характеристик те же обозначения, соответственно,  $\pi_k$  и  $m_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , что были использованы в исходной модели. Формальные определения  $\pi_k$  и  $m_k$  имеют такой вид:

$$\pi_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(i_1, i_2, \dots, i_n), \quad (3.2)$$

$$m_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(i_1, i_2, \dots, i_n) i_k b_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

Пусть  $y_k$  — среднее число заявок  $k$ -го потока, находящихся на обслуживании,  $y_k = \frac{m_k}{b_k}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Воспользовавшись формулой Литтла (2.4), получим соотношения, связывающие введенные характеристики. Среднее время  $W$  обслуживания заявки

$k$ -го потока находится из равенства  $W = 1/\mu_k$ . Среднее число заявок  $k$ -го потока, находящихся на обслуживании  $L$ , определяется из соотношения  $L = y_k$ . Интенсивность потока заявок  $k$ -го потока, попадающих на обслуживание, определяется из соотношения  $\lambda_k(1-\pi_k)$ . Из формулы Литтла (2.4) следует равенство

$$\frac{1}{\mu_k} = \frac{y_k}{\lambda_k(1-\pi_k)}. \quad (3.4)$$

Откуда получаем

$$\lambda_k(1-\pi_k) = \mu_k y_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.5)$$

Будем далее предполагать, что среднее время обслуживания заявки  $k$ -го потока равно единице. В результате интенсивности поступления заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , будут выражены в эрлангах, т.е. в среднем числе потенциальных соединений  $a_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Во введенных обозначениях равенства (3.5) переписываются в виде следующих соотношений

$$a_k(1-\pi_k) = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

или

$$a_k b_k (1-\pi_k) = m_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.7)$$

### 3.2.3. Свойство мультипликативности

Исследуемая модель иерархической сети является частным случаем мультисервисной сети, обслуживающей потоки заявок на передачу трафика сервисов реального времени, для которой доказано наличие свойства мультипликативного представления значений  $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Оно имеет вид:

$$P(i_1, i_2, \dots, i_n) = \frac{1}{N} \frac{a_1^{i_1}}{i_1!} \frac{a_2^{i_2}}{i_2!} \dots \frac{a_n^{i_n}}{i_n!}, \quad (i_1, i_2, \dots, i_n) \in S, \quad (3.8)$$

где

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

- значение нормировочной константы.

Приведем альтернативное соотношение, которое будет использовано для вычисления  $\pi_k, k=1, 2, \dots, n$ . Включим во множество  $G_k$  те состояния сети  $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$ , когда заявка  $k$ -го потока принимается к обслуживанию, т.е. выполняется соотношение

$$G_k = (i_1, \dots, i_{k-1}, i_k + 1, i_{k+1}, \dots, i_n) \in S. \quad (3.9)$$

Чтобы построить множество состояний  $G_k$  нужно взять множество состояний  $S$  исследуемой модели и, если это возможно, исключить из него все состояния  $U_k$ , когда заявка  $k$ -го потока получает отказ в обслуживании. Таким образом, справедливо соотношение

$$S = G_k \cup U_k. \quad (3.10)$$

Иными словами, чтобы построить множество  $G_k$  нужно взять множество состояний  $S$  и уменьшить на величину  $b_k$  число канальных единиц во всех звеньях  $k$ -го маршрута. Обозначим через  $N(B)$  нормировочную константу, рассчитанную с использованием соотношения (3.8), для произвольного подмножества  $B$  множества  $S$ . Из (3.8) и (3.10) следует соотношение для оценки  $\pi_k$

$$\pi_k = 1 - \frac{N(G_k)}{N(S)}. \quad (3.11)$$

Из приведенной формулы следует, что для расчета  $\pi_k$  достаточно рассчитать нормировочные константы для исследуемой модели сети и аналогичной модели с уменьшенным на величину  $b_k$  числом канальных единиц во всех звеньях  $k$ -го маршрута.

### 3.2.4. Звено иерархической сети

Рассмотрим частный случай исследуемой модели иерархической сети, когда в каждом маршруте имеется только две соединительных линии. Процесс функционирования модели полностью совпадает с процессом функционирования модели иерархической сети, изложенным в подразделах 3.2.1-3.2.3, поэтому приводить его не будем. Обозначим через  $c_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  максимально возможное число заявок  $k$ -го потока, которые могут одновременно находиться на обслуживании. Структура рассматриваемой модели показана на рисунке 3.1.

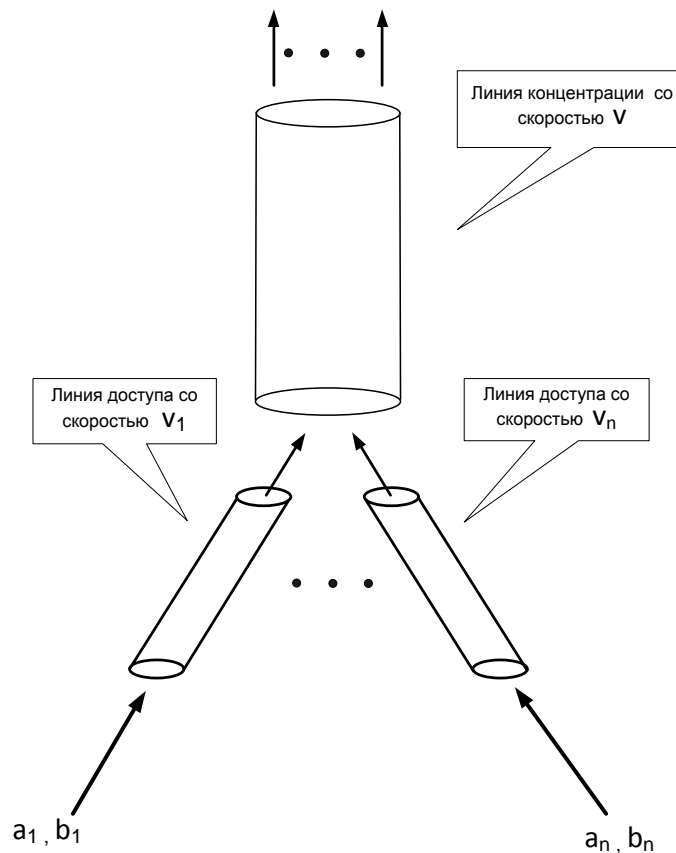


Рисунок 3.1 - Звено мультисервисной сети доступа

Значения доли потерянных заявок  $\pi_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , и среднего числа занятых канальных единиц  $m_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , находятся с помощью алгоритма свертки [139], который следует из свойства мультипликативности (3.8). Сформулируем основные шаги расчетного алгоритма. Вначале определим

процедуру свертки. Результат свёртки вектора  $x = (x(0), x(1), \dots)$  и  $y = (y(0), y(1), \dots)$  будет вектор  $z = (z(0), z(1), \dots)$  с компонентами, вычисляемыми по формулам  $z(0) = x(0)y(0)$ ,  $z(1) = x(0)y(1) + x(1)y(0)$  и т.д. Обозначим результат свертки по этим правилам как  $z = x \otimes y$ .

Алгоритм свертки следует из свойства мультипликативности и состоит в следующих действиях.

1. На начальном этапе находятся компоненты  $P_k(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, c_k b_k$ , вектора  $P_k$  индивидуального распределения ненормированных вероятностей занятости  $i$  канальных единиц линии на обслуживание заявок  $k$ -го потока. Компоненты вектора находятся в предположении, что на обслуживание поступают только заявки  $k$ -го потока. Для вычисления компонент используются следующие формулы. Положим  $P_k(0) = 1$  и рассчитаем, используя формулу Эрланга, значения  $P_k(i_k b_k)$  для  $i_k = 0, 1, \dots, k$ , воспользовавшись равенствами

$$P_k(i_k b_k) = \frac{a_k^{i_k}}{i_k!}, \quad i_k = 0, 1, \dots, c_k.$$

Вектором индивидуального распределения  $k$ -го потока назовем вектор  $P_k$  с компонентами  $P_k = (P_k(0), P_k(1), \dots, P_k(c_k b_k))$ , которые находятся из равенств

$$P_k(i) = \begin{cases} \frac{a_k^{i_k}}{i_k!}, & i = i_k b_k, \quad i_k = 0, 1, \dots, c_k; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Компоненты вектора  $P_k$  находятся для всех  $k = 1, 2, \dots, n$ .

2. На втором этапе реализации алгоритма выполняется свёртка векторов  $P_k$ . Пусть  $P^{(l)} = P_1 \otimes P_2 \otimes \dots \otimes P_l$ ,  $l = 2, 3, \dots, v$ .
3. В результате выполнения последней свёртки находятся ненормированные значения вероятностей  $P(i)$ ,  $i = 2, 3, \dots, v$  занятости  $i$  канальных единиц



линии на обслуживание всех принятых заявок

$$P(i) = \sum_{u=0}^i P_n(u) P^{(n-1)}(i-u) I(u \leq c_n b_n, i-u \leq v). \quad (3.13)$$

Здесь  $I(\bullet)$  — индикаторная функция, а для вычисления  $\pi_n$  используется соотношение

$$\pi_n = \sum_{i=v-b_n+1}^v P(i) + P_n(v_n b_n) \sum_{i=v_n b_n}^{v-b_n} P^{(n-1)}(i - c_n b_n). \quad (3.14)$$

Значение  $m_n$  вычисляется по формуле

$$m_n = \sum_{i=1}^u \sum_{u=0}^i P_n(u) P^{(n-1)}(i-u) u I(u \leq v_n b_n, i-u \leq v). \quad (3.15)$$

Истинные значения  $\pi_n, m_n$  и вероятностей  $P(i)$  находятся после нормировки.

Нормировочная константа определяется из выражения

$$N = \sum_{i=0}^v P(i).$$

Для расчета значений  $\pi_k, m_k$  для всех  $k = 1, 2, \dots, n$  требуется реализовать шаги алгоритма  $n$  раз. При этом последняя свёртка выполняется с индивидуальным распределением вероятностей  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

### 3.2.5. Алгоритм расчета характеристик иерархической сети

В общем случае значения характеристик также рассчитываются с использованием алгоритма свертки. Используя результаты [86,139], изложим основные шаги вычислительной процедуры. Реализацию метода поясним с помощью модели иерархической сети, показанной на рисунке 2.3. Поскольку справедливы соотношения (3.6) и (3.7), то для построения процедуры оценки характеристик модели достаточно указать алгоритм оценки  $\pi_k$  доли потерянных заявок  $k$ -го потока. Из соотношения (3.11) следует, что для расчета  $\pi_k$  достаточно построить алгоритм вычисления нормировочной константы, определенной соотношением мультипликативности (3.8). Алгоритм свертки следует из свойства

мультипликативности и состоит в следующих действиях [86,139].

1. Примем скорости передачи информации линий второго и последующих этапов установления соединения равными бесконечности. Рассчитаем для каждого потока и каждой линии первого этапа индивидуальные распределения вероятностей. Пусть  $v_j$  — скорость  $j$ -ой линии первого этапа,  $c_k$  — максимально возможное число заявок  $k$ -го потока, которые могут одновременно находиться на обслуживании, а  $k$  — номер потока. Тогда индивидуальное распределение вероятностей рассчитывается по формуле:

$$P_k(i) = \begin{cases} \frac{a_k^{i_k}}{i_k!}, & i = i_k b_k, \quad i_k = 0, 1, \dots, c_k b_k; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.16)$$

Обозначим с помощью функции  $f_{j,1}$  распределение ненормированных вероятностей количества занятых единиц канального ресурса на  $j$ -ой линии первого этапа, найденное с помощью реализации процедуры свертки (см. предыдущий подраздел) индивидуальных распределений (3.16) всех потоков трафика, поступающих на  $j$ -ю линию. Для иерархической сети, изображенной на рисунке 2.3, получаем следующие результаты:

$$\begin{aligned} f_{1,1} &= P_1 \otimes P_2; & f_{2,1} &= P_3 \otimes P_4; & f_{3,1} &= P_5 \otimes P_6; & f_{4,1} &= P_7 \otimes P_8; & f_{5,1} &= P_9 \otimes P_{10}; \\ f_{6,1} &= P_{11} \otimes P_{12}; & f_{7,1} &= P_{13} \otimes P_{14}; & f_{8,1} &= P_{15} \otimes P_{16}; & f_{9,1} &= P_{17} \otimes P_{18}. \end{aligned}$$

2. Примем скорости передачи информации линий третьего и последующих этапов установления соединения равными бесконечности и найдем с помощью реализации процедуры свертки (см. предыдущий подраздел) функции  $f_{j,2}$  распределения ненормированных вероятностей количества занятых единиц канального ресурса на  $j$ -ой линии второго этапа. Для

иерархической сети, изображенной на рисунке 2.3, получаем следующие результаты:

$$f_{10,2} = f_{1,1} \otimes f_{2,1} \otimes f_{3,1} \otimes f_{4,1}; \quad f_{11,2} = f_{5,1} \otimes f_{6,1}; \quad f_{12,2} = f_{7,1} \otimes f_{8,1} \otimes f_{9,1}.$$

3. Аналогичным образом находятся распределения вероятностей занятости каналов в  $j$ -й линии  $l$ -го этапа установления соединения. Обозначим это распределение с помощью функции  $f_{j,l}$ . Для последней  $J$ -ой линии  $q$ -го этапа установления соединения это будет функция  $f_{J,q}$ . Для иерархической сети, изображенной на рисунке 2.3, получаем следующие результаты  $f_{J,q} = f_{10,2} \otimes f_{11,2} \otimes f_{12,2}$ .

4. Для нормированных значений найденных вероятностей справедливо соотношение

$$g_{J,q}(0) + g_{J,q}(1) + \dots + g_{J,q}(v_J) = N(S), \quad (3.17)$$

которое обеспечивает возможность расчета характеристик обслуживания  $k$ -го потока заявок с помощью соотношения (3.11). Для вычисления нормировочной константы  $N(G_k)$  необходимо воспользоваться анализируемой моделью иерархической сети с уменьшенной на величину  $b_k$  пропускной способностью звеньев сети, которые используются при обслуживании заявок  $k$ -го потока. Меняя величину  $k$  от единицы до  $n$ , находятся характеристики обслуживания всех  $n$  потоков заявок.

### 3.3. Оценка характеристик звена иерархической сети с повторением заблокированной заявки

#### 3.3.1. Математическое описание модели

Рассмотрим модель иерархической сети доступа, в которой имеются две соединительные линии при установлении любого соединения и абонент, получив отказ в обслуживании, повторяет вызов с вероятностью, зависящей от номера потока и от количества ранее полученных отказов. Процесс функционирования

модели аналогичен процессу функционирования модели иерархической сети, изложенной в подразделе 2.2, поэтому приведем его в кратком изложении. Структура рассматриваемой модели показана на рисунке 3.2.

Процесс установления соединения в исследуемой модели сети проще, чем в модели иерархической сети с учетом влияния поведения абонента, рассмотренной в подразделе 2.2. Это дает возможность построить алгоритм оценки вероятностных характеристик модели, основанный на составлении и решении системы уравнений статистического равновесия.

В модели рассматривается процесс обслуживания  $n$  потоков заявок на установление соединения в иерархической сети, имеющей структуру, отображенную на рисунке 3.2. Учёт ограниченности доступа заявок описывается в данном случае следующим образом. Если заявке  $k$ -го потока не хватает канального ресурса линии доступа или на линии концентрации, то она получает отказ. Обозначим через  $v$  скорость линии концентрации, а через  $v_k$  обозначим скорость линии доступа. Занумеруем линии доступа также, как и поступающие потоки трафика. Таким образом,  $k$ -му потоку доступна  $k$ -я линия доступа. Если в  $k$ -й линии доступа и в линии концентрации имеются  $b_k$  единиц канального ресурса, то они занимают на время передачи трафика сервиса реального времени, ассоциированного с обслуживанием заявки  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Это время имеет экспоненциальное распределение с параметром  $\mu_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Формально сформулированные выше условия, можно записать следующим образом: заявка  $k$ -го потока принимается к обслуживанию, если одновременно выполняются два условия:  $b_k i_k + b_k \leq v_k$  и  $\sum_{k=1}^n b_k i_k + b_k \leq v$ .

Если поступившая заявка  $k$ -го потока получает отказ, а он может наступить из-за нехватки ресурса передачи в  $k$ -ой линии доступа или в линии концентрации, то с вероятностью  $H_{k,1}$ , если отказ получен в первой попытке соединения, и с вероятностью  $H_{k,2}$ , если отказ получен в повторной попытке соединения, абонент повторяет вызов через случайное время, имеющее экспоненциальное распределение с параметром  $\gamma_k$ .

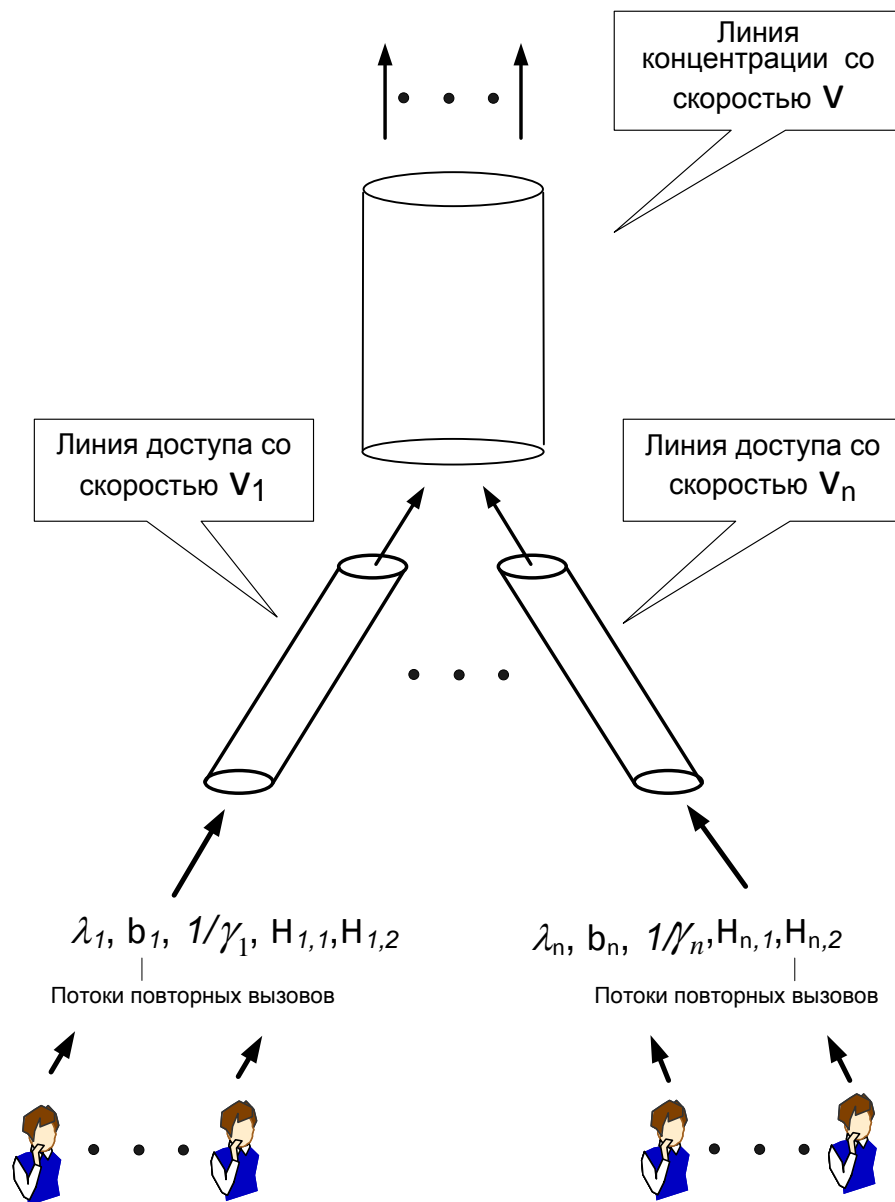


Рисунок 3.2 - Звено мультисервисной сети доступа с учетом влияния повторения заблокированной заявки

### 3.3.2. Характеристики качества обслуживания заявок

Обозначим через  $j_k$  число абонентов, формирующих  $k$ -й поток заявок, находящихся в случайный момент времени в состоянии ее повторения, а через  $i_k$  обозначим число заявок  $k$ -го потока, находящихся на обслуживании. Вектор

состояния модели сети имеет вид  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Функционирование модели во времени описывается многомерным марковским процессом

$$r(t) = (j_1(t), j_2(t), \dots, j_n(t), i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)),$$

где  $j_k(t)$  — число абонентов, формирующих  $k$ -й поток заявок, находящихся в момент времени  $t$  в состоянии ее повторения, а  $i_k(t)$  — число заявок  $k$ -го потока, находящихся в момент времени  $t$  на обслуживании.

Процесс  $r(t)$  определён на пространстве состояний  $S$ , куда включены состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ , обладающие следующими свойствами:

$$i_k b_k \leq v_k, \quad k=1, \dots, n, \quad i_1 b_1 + \dots + i_n b_n \leq v.$$

Во множество состояний  $U_k$ , где заявка  $k$ -го потока получает отказ в обслуживании, входят состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ , обладающие следующими свойствами:

$$i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i_1 b_1 + \dots + i_n b_n + b_k > v. \quad (3.18)$$

Обозначим через  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  стационарную вероятность состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Вероятности состояний модели имеют интерпретацию доли времени пребывания исследуемой модели в состоянии  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  и могут использоваться для оценки характеристик качества обслуживания поступающих заявок. Перечень характеристик и их свойства введены в подразделе 2.2.7. Для оценки характеристик в соответствии с введенными определениями необходимо составить и решить систему уравнений равновесия, связывающую значения вероятностей  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Она является частным случаем системы уравнений равновесия (2.2), но выглядит проще из-за более простого характера маршрутов следования трафика. Поскольку она будет использоваться для оценки характеристик модели приведем ее вид. Обозначим через  $i$  общее число канальных единиц, занятых на обслуживание заявок в линии концентрации  $i = i_1 b_1 + i_2 b_2 + \dots + i_n b_n$ . Система уравнений равновесия анализируемой модели сети имеет вид:

$$\begin{aligned}
& P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \times \\
& \left( \sum_{k=1}^n (\lambda_k + j_k \gamma_k) I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v) + (\lambda_k H_{k,1} + j_k \gamma_k (1 - H_{k,2})) \times \right. \\
& \quad \left. \times I(i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + i_k \mu_k I(i_k > 0) \right) = \\
& = \sum_{k=1}^n P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k I(i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k I(i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k - 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \lambda_k H_{k,1} I(i_k > 0) \times \\
& \quad \times I(i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \gamma_k I(i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k (1 - H_{k,2}) \times \\
& \quad \times I(i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \mu_k \times \\
& \quad \times I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

В (3.19) символ  $I(\bullet)$  — индикаторная функция, принимающая значение единица, если выполнено условие, сформулированное в скобках, и равное нулю, если условие, сформулированное в скобках, не выполняется. Для вероятностей  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  выполняется условие нормировки.

$$\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) = 1.$$

Для решения системы уравнений равновесия используются стандартные численные методы из линейной алгебры.

### 3.3.3. Алгоритм расчета характеристик

Матрица системы уравнений равновесия (3.19) имеет очень малое количество ненулевых элементов и для их оценки можно использовать рекурсивные формулы, зависящие от значений компонент состояния модели  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Из опыта решения систем уравнений равновесия для марковских моделей, используемых в теории телетрафика [86], следует, что для определения значений  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  лучшего всего подходят итерационные методы, основанные на применении алгоритма последовательных подстановок. К таким методам принадлежит итерационный алгоритм Гаусса-Зейделя [86].

Для его использования необходимо ограничить число неизвестных в системе уравнений равновесия [89]. Для этого будем предполагать, что максимальное число абонентов, формирующих  $k$ -й поток трафика и одновременно находящихся в состоянии повторения вызова, ограничено и не превосходит значение  $n_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Величины  $n_k$  подбираются опытным путем на основании анализа данных численных расчетов. Также можно использовать теоретические результаты, полученные при исследовании моделей с учетом влияния повторных вызовов [82-89]. Обозначим через  $S^*$  пространство состояний с ограниченными подобным образом значениями интервалов изменения  $j_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . В пространство  $S^*$  включены состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ , обладающие следующими свойствами:

$$j_k \leq n_k, \quad k=1,2,\dots,n, \quad i_k b_k \leq v_k, \quad k=1,2,\dots,n, \quad i_1 b_1 + \dots + i_n b_n \leq v.$$

Аналогичным образом меняется определение множества состояний  $U_k$ , где заявка  $k$ -ого потока получает отказ в обслуживании. Обозначим соответствующее множество символом  $U_k^*$ . Во множество  $U_k^*$  входят состояния  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ , обладающие следующими свойствами:

$$j_k \leq n_k, \quad k=1,\dots,n, \quad i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i_1 b_1 + \dots + i_n b_n + b_k > v.$$

При построении вспомогательной модели в схеме функционирования



исходной модели делаются следующие изменения. Если абонент, участвующий в формировании  $k$ -го потока трафика, получает отказ в первичной или вторичной попытках соединения, а в модели уже имеется  $n_k$  абонентов повторяющих вызов, то с вероятностью единица рассматриваемый абонент получает отказ в обслуживании и покидает систему необслуженным. Обозначим через  $i$  общее число канальных единиц, занятых на обслуживание заявок в линии концентрации  $i = i_1 b_1 + i_2 b_2 + \dots + i_n b_n$ . Для построенной вспомогательной модели система уравнений равновесия приобретает вид

$$\begin{aligned}
 & P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \times \tag{3.20} \\
 & \times \left( \sum_{k=1}^n (\lambda_k + j_k \gamma_k) I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v) + \right. \\
 & + \lambda_k H_{k,1} I(j_k < n_k, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
 & + j_k \gamma_k (1 - H_{k,2}) I(i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
 & \left. + i_k \mu_k I(i_k > 0) \right) = \\
 & = \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k I(i_k > 0) + \\
 & + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \times \\
 & \times (j_k + 1) \gamma_k I(j_k + 1 \leq n_k, i_k > 0) + \\
 & + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k - 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \lambda_k H_{k,1} \times \\
 & \times I(j_k \geq 1, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
 & + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k (1 - H_{k,2}) \times \\
 & \times I(j_k + 1 \leq n_k, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^n P(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \mu_k \times \\
& \times I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v).
\end{aligned}$$

Для вероятностей  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  выполняется условие нормировки.

$$\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S^*} P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) = 1.$$

Определение характеристик качества обслуживания заявок, полученные с использованием вспомогательной модели, аналогичны определению характеристик исходной модели, приведенному в подразделе 2.2.7, только с заменой  $S$  на  $S^*$  и  $U_k$  на  $U_k^*$ . Теперь сформулируем способ решения системы уравнений равновесия (3.20), основанный на использовании итерационной схемы Гаусса-Зейделя [86].

Обозначим через  $P^{(r)}(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$   $r$ -ое приближение к ненормированному значению стационарной вероятности  $P(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$  состояния модели  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n)$ , полученное с применением итерационного алгоритма Гаусса-Зейделя. Применение итерационного метода Гаусса-Зейделя заключается в выполнении следующих шагов.

1. Обычно начальное приближение для  $r=0$  выбирают из следующего условия  $P^{(0)}(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) = 1$  для всех состояний модели  $(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) \in S^*$ .
2. Расчетная формула для вычисления компонент  $(r+1)$ -го приближения по известным значениям компонент  $(r+1)$ -го и  $r$ -го приближений имеет вид:

$$\begin{aligned}
& P^{(r)}(j_1, j_2, \dots, j_n, i_1, i_2, \dots, i_n) = \tag{3.21} \\
& = \frac{1}{X} \left( \sum_{k=1}^n P^{(r+1, r)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \lambda_k I(i_k > 0) + \right. \\
& \left. + \sum_{k=1}^n P^{(r+1, r)}(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k - 1, \dots, i_n) \times \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times (j_k + 1) \gamma_k I(j_k + 1 \leq n_k, i_k > 0) + \\
& + \sum_{k=1}^n P^{(r+1,r)}(j_1, \dots, j_k - 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \lambda_k H_{k,1} \times \\
& \times I(j_k \geq 1, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& + \sum_{k=1}^n P^{(r+1,r)}(j_1, \dots, j_k + 1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) (j_k + 1) \gamma_k (1 - H_{k,2}) \times \\
& \times I(j_k + 1 \leq n_k, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& + \sum_{k=1}^n P^{(r+1,r)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_k + 1, \dots, i_n) (i_k + 1) \mu_k \times \\
& \times I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v) \Big).
\end{aligned}$$

выражение для  $X$  записывается в виде соотношения:

$$\begin{aligned}
X = & \left( \sum_{k=1}^n (\lambda_k + j_k \gamma_k) I(i_k b_k + b_k \leq v_k, i + b_k \leq v) + \right. \\
& + \lambda_k H_{k,1} I(j_k < n_k, i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& + j_k \gamma_k (1 - H_{k,2}) I(i_k b_k + b_k > v_k \quad \text{или} \quad i + b_k > v) + \\
& \left. + i_k \mu_k I(i_k > 0) \right).
\end{aligned}$$

Знак  $(r+1, r)$  говорит, что вначале используются компоненты  $(r+1)$ -го приближения, а если их нет, то компоненты  $r$ -го приближения.

3. Сходимость итерационной процедуры определяется из уровня близости последовательных приближений, которая оценивается из выражения

$$\sum_{(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \in S^*} \frac{|P^{(r+1)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) - P^{(r)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n)|}{P^{(r+1)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n)},$$

и должно иметь порядок  $\sim 10^{-8} \dots 10^{-10}$ .

4. После достижения сходимости по сформулированному критерию

вычисляются нормированные вероятности состояний модели

$$P(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) = \frac{P^{(r+1)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n)}{\sum_{(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n) \in S^*} P^{(r+1)}(j_1, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n)}.$$

Данный подход может быть использован для решения систем уравнений равновесия, состоящих из нескольких миллионов неизвестных. Результаты теоретических исследований показали, что итерационный метод не всегда сходится. Однако опыт практического использования данного подхода [91-98] показывает, что в большинстве случаев сходимость метода имеет место.

### 3.4. Численный анализ характеристик модели

Вспользуемся разработанным в предыдущем подразделе алгоритмом и проведем численный анализ зависимости характеристик от изменения значений входных параметров. Вначале рассмотрим зависимость характеристик от выбора величины  $n_k$ , ограничивающей интервал изменения максимального числа абонентов повторяющих вызов. Рассмотрим модель звена со следующими фиксированными значениями входных параметров:  $v=50$  к.е.;  $n=2$ ;  $H_{1,1}=0,7$ ;  $H_{2,1}=0,7$ ;  $H_{1,2}=0,9$ ;  $H_{2,2}=0,9$ ;  $\gamma_1=5$ ;  $\gamma_2=5$ ;  $\mu_1=1$ ;  $\mu_2=1$ ;  $b_1=1$  к.е.;  $b_2=5$  к.е.;  $v_1=30$  к.е.;  $v_2=40$  к.е.;  $\lambda_1=v/2b_1$ ;  $\lambda_2=v/2b_2$ . На рисунке 3.3 показана зависимость значений  $\pi_{1,2}$  и  $\pi_{2,2}$  доли потерянных первичных и повторных заявок 1-го и 2-го потоков от изменения  $n_1=n_2$  от нуля (нет повторных вызовов) до 32. Для анализируемой модели значения  $\pi_{1,2}$  и  $\pi_{2,2}$  рассчитываются из соотношений:

$$\pi_{1,2} = \frac{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_1 > v \text{ или } i_1 b_1 + b_1 > v_1} P(j_1, j_2, i_1, i_2)(\lambda_1 + j_1 \gamma_1)}{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v_1 \text{ и } i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2)(\lambda_1 + j_1 \gamma_1)}; \quad (3.22)$$

$$\pi_{2,2} = \frac{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_2 > v \text{ или } i_2 b_2 + b_2 > v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2)(\lambda_2 + j_2 \gamma_2)}{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v_1 \text{ и } i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2)(\lambda_2 + j_2 \gamma_2)}.$$

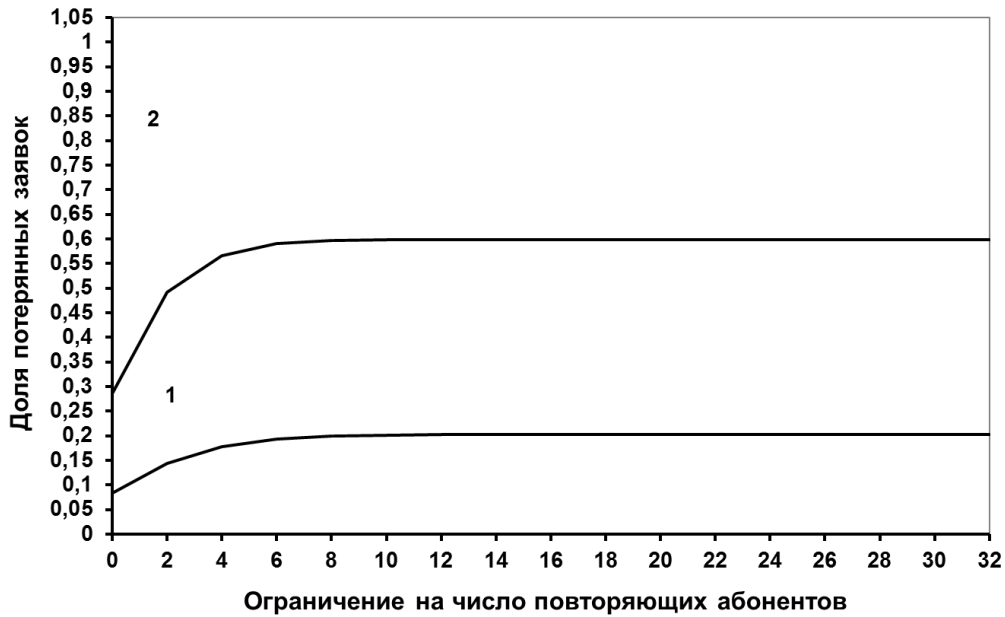


Рисунок 3.3 - Зависимость доли потерянных первичных и повторных заявок 1-го и 2-го потоков от  $n_1 = n_2$

В приведенных здесь и далее формулах суммирование ведется по всем состояниям  $(j_1, j_2, i_1, i_2) \in S$  и компонентами, удовлетворяющими сформулированным под знаком суммы неравенствам.

Приведенные данные показывают, что с увеличением ограничения на величину максимального числа абонентов, повторяющих вызов, вероятностные характеристики модели начинают быстро сходиться к значению, которое соответствует случаю, когда такого ограничения нет, т.е.  $n_1 = n_2 = \infty$ . Выбор ограничения, которое используется при проведении вычислений, осуществляется опытным путем. Из результатов [89] следует, что косвенным указателем на степень сходимости характеристик является величина вероятности пребывания модели в состоянии, когда на повторении имеется  $n_1$  или  $n_2$  абонентов. Покажем это в анализируемом численном примере.

Для вспомогательной модели с ограниченным числом абонентов, повторяющих вызов, законы сохранения интенсивностей, поступающих и обслуженных системой потоков трафика (см. (2.3)) имеют вид:

$$r_k \gamma_k = \lambda_k \pi_{k,1} H_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k H_{k,2} - \lambda_k \pi_k^* H_{k,1}; \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (3.23)$$

$$\lambda_k + r_k \gamma_k = \lambda_k \pi_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k + y_k \mu_k; \quad k=1,2,\dots,n,$$

где

$$\pi_k^* = \sum_{i \text{ или } i_k b_k + b_k > v_k} P(j_1, \dots, n_k, \dots, j_n, i_1, \dots, i_n).$$

Величины  $\pi_k^*$ , показывают степень близости характеристик модели с ограниченным и неограниченным числом абонентов, повторяющих вызов. Используя результаты [89] можно получить и явные формулы для оценки погрешности. Однако выглядят они громоздко и здесь не приводятся. В таблице 3.1 показана зависимость погрешности оценки  $\pi_{1,2}$  и  $\pi_{2,2}$  от величины  $n_1 = n_2$  для модели со значениями входных параметров, которые использовались при расчете характеристик, представленных на рисунке 3.3. Полученные данные показывают возможность использования величин  $\pi_1^*$ ,  $\pi_2^*$  для определения  $n_1$ ,  $n_2$ , ограничивающих интервал изменения максимально возможного числа абонентов, одновременно повторяющих вызов.

Рассмотрим модель звена со следующими фиксированными значениями входных параметров:  $v=50$  к.е.;  $\gamma_1=5$ ;  $\gamma_2=5$ ;  $\mu_1=1$ ;  $\mu_2=1$ ;  $b_1=1$  к.е.;  $b_2=5$  к.е.;  $v_1=30$  к.е.;  $v_2=40$  к.е.;  $\lambda_1=v/2b_1$ ;  $\lambda_2=v/2b_2$  и исследуем зависимость значений  $\pi_{1,3}$  и  $\pi_{2,3}$  доли повторных заявок в общем потоке заявок соответственно 1-го и 2-го потоков и  $f_1$  и  $f_2$  среднего числа повторных вызовов соответственно 1-го и 2-го потоков на один первичный вызов соответствующего потока от изменения  $H_{1,1} = H_{2,1} = H_{1,2} = H_{2,2}$  от 0 до 0,99. Для рассматриваемой модели значения  $\pi_{1,3}$ ,  $\pi_{2,3}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  рассчитываются из соотношений

$$\pi_{1,3} = \frac{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_1 \gamma_1}{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) (\lambda_1 + j_1 \gamma_1)};$$

$$\pi_{2,3} = \frac{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_2 \gamma_2}{\sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) (\lambda_2 + j_2 \gamma_2)};$$

Таблица 3.1.

Зависимость погрешности, вносимой в рассчитываемые характеристики  
ограниченностью числа абонентов, повторяющих вызов

$n_1 = n_2$	$\pi_{1,2}$	$\pi_1^*$	$\pi_{2,2}$	$\pi_2^*$
0	0,084070	1,471231E+000	0,286318	1,002114E+000
2	0,144133	8,079480E-001	0,490995	3,508601E-001
4	0,177457	3,513545E-001	0,565548	9,924565E-002
6	0,192744	1,310055E-001	0,589926	2,149022E-002
8	0,198981	4,374519E-002	0,596500	3,565868E-003
10	0,201325	1,339304E-002	0,597981	4,653621E-004
12	0,202142	3,804205E-003	0,598285	4,914651E-005
14	0,202405	1,009180E-003	0,598348	4,300808E-006
16	0,202483	2,511658E-004	0,598362	3,177119E-007
18	0,202504	5,885205E-005	0,598365	2,010700E-008
20	0,202510	1,302059E-005	0,598366	1,103362E-009
22	0,202511	2,726835E-006	0,598366	5,303086E-011
24	0,202511	5,417861E-007	0,598366	2,251819E-012
26	0,202511	1,023403E-007	0,598366	8,511360E-014
28	0,202511	1,841520E-008	0,598366	2,882712E-015
30	0,202511	3,162607E-009	0,598366	8,800262E-017
32	0,202511	5,193507E-010	0,598366	2,434274E-018

$$f_1 = \frac{1}{\lambda_1} \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_1 \gamma_1;$$

$$f_2 = \frac{1}{\lambda_2} \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_2 \gamma_2.$$

Анализируемые зависимости для  $\pi_{1,3}$  и  $\pi_{2,3}$  показаны на рисунках 3.4 и 3.6, а для  $f_1$  и  $f_2$  на рисунках 3.5 и 3.7. Цифра у кривых показывает номер потока. Из полученных данных видно, что настойчивость абонента к установлению соединения является одним из важнейших факторов, влияющих на процесс формирования входного потока заявок. Особенно сильно действие этого фактора проявляется, когда вероятность повторения вызова становится близка к единице и увеличивается потребность в ресурсе передачи информации для обслуживания поступившей заявки. Приведем значения других характеристик, которые также подтверждают сформулированные ранее выводы.

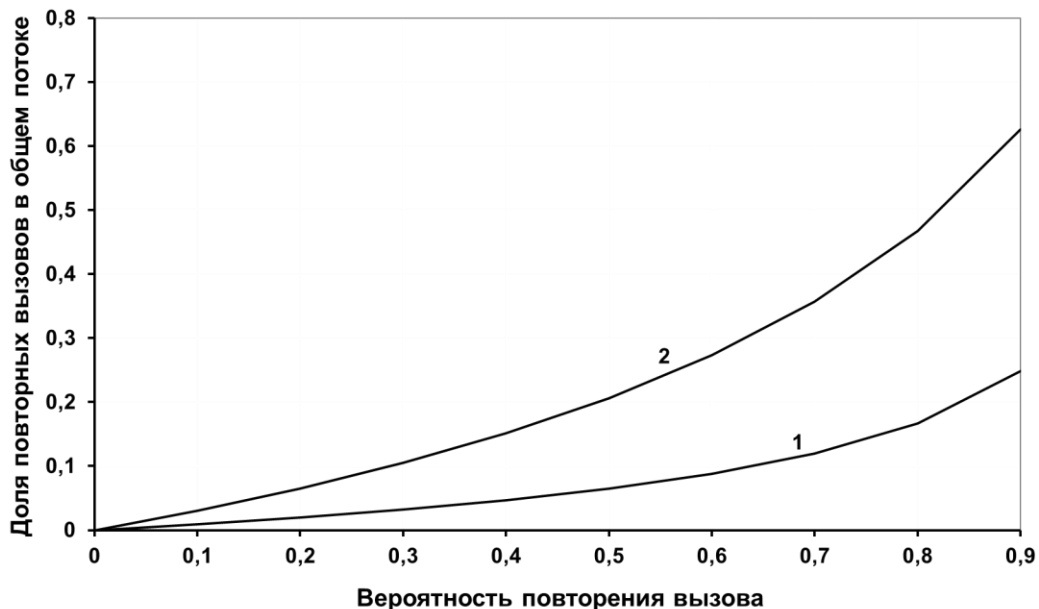


Рисунок 3.4 - Зависимость доли повторных заявок 1-го и 2-го потоков в общем потоке заявок от настойчивости абонента в установлении соединения



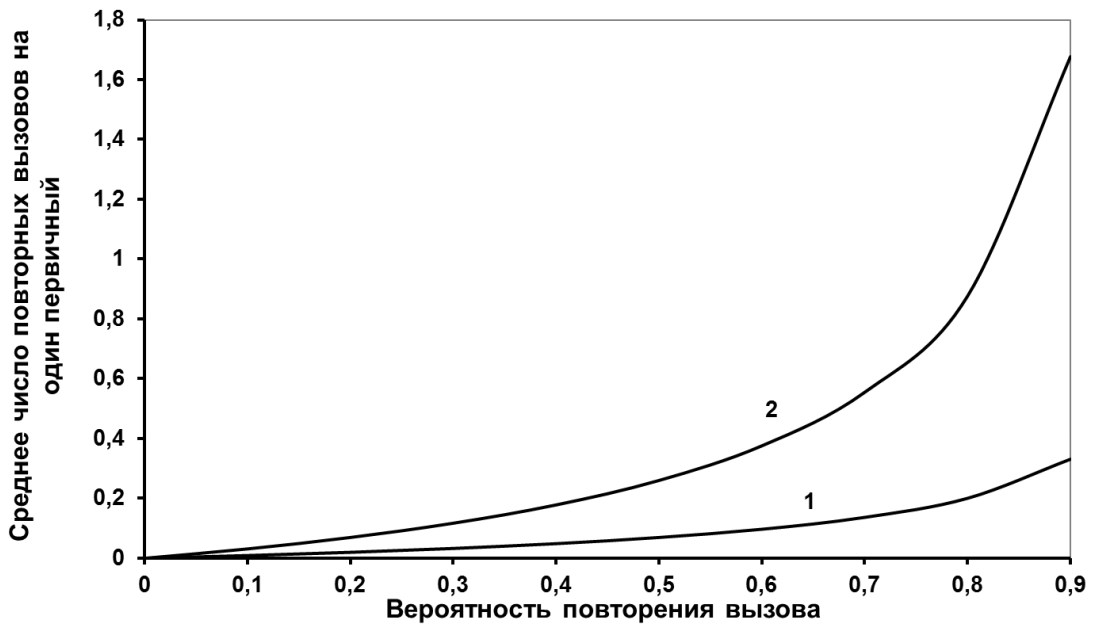


Рисунок 3.5 - Зависимость среднего числа повторных заявок 1-го и 2-го на один первичный вызов от настойчивости абонента в установлении соединения

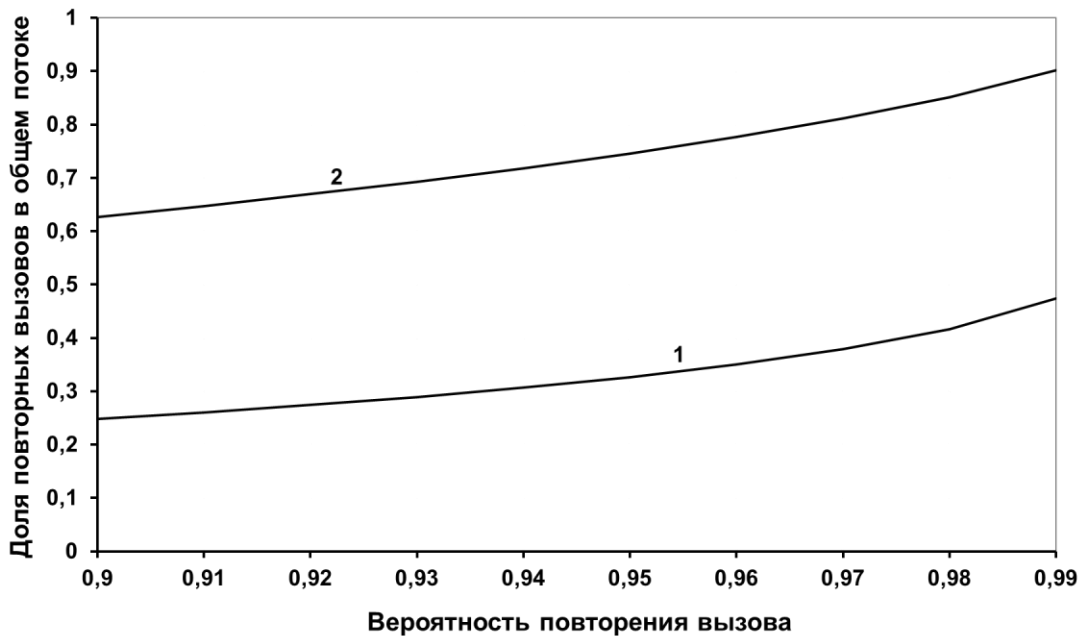


Рисунок 3.6 - Зависимость доли повторных заявок 1-го и 2-го потоков в общем потоке заявок от настойчивости абонента в установлении соединения

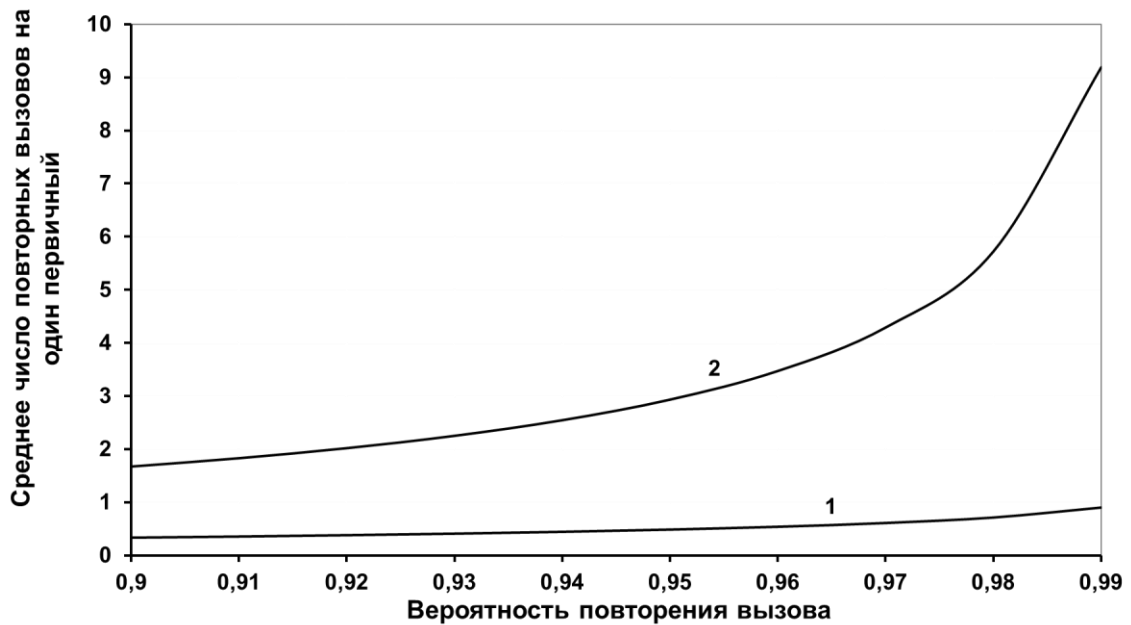


Рисунок 3.7 - Зависимость среднего числа повторных заявок 1-го и 2-го потоков на один первичный вызов от настойчивости абонента в установлении соединения

В таблицах 3.2 и 3.3 для первого потока показана зависимость  $\pi_{1,2}$  доли потерянных первичных и повторных заявок,  $r_1$  среднего числа абонентов, повторяющих вызов,  $m_{p,1}$  среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание первичных заявок и  $m_{r,1}$  среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание повторных заявок от изменения  $H = H_{1,1} = H_{2,1} = H_{1,2} = H_{2,2}$  от 0 до 0,99. В таблицах 3.4 и 3.5 эти же зависимости рассчитаны для характеристик второго потока.

Для анализируемой модели характеристики  $\pi_{1,2}$  и  $\pi_{2,2}$  определяются из выражений (3.22), а  $r_1, r_2, m_{p,1}, m_{p,2}, m_{r,1}, m_{r,2}$  рассчитываются из соотношений

$$r_1 = \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_1;$$

$$r_2 = \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 \leq v, i_1 b_1 \leq v_1, i_2 b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_2;$$

$$m_{p,1} = \lambda_1 (1 - \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_1 > v \text{ или } i_1 b_1 + b_1 > v_1} P(j_1, j_2, i_1, i_2));$$

$$m_{p,2} = \lambda_2 (1 - \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_2 > v \text{ или } i_1 b_1 + b_2 > v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2));$$

$$m_{r,1} = \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_1 \leq v, i_1 b_1 + b_1 \leq v_1} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_1 \gamma_1;$$

$$m_{r,2} = \sum_{i_1 b_1 + i_2 b_2 + b_2 \leq v, i_2 b_2 + b_2 \leq v_2} P(j_1, j_2, i_1, i_2) j_2 \gamma_2.$$

Таблица 3.2.

Зависимости характеристик модели от увеличения настойчивости абонента в  
установлении соединения

$H$	$\pi_{1,2}$	$r_1$	$m_{p,1}$	$m_{r,1}$
0,0	0,084070	0,000000	22,898242	0,000000
0,1	0,090158	0,045489	22,793515	0,159480
0,2	0,097329	0,099262	22,670541	0,344227
0,3	0,105929	0,164109	22,523520	0,561875
0,4	0,116474	0,244331	22,343702	0,823816
0,5	0,129782	0,346970	22,117108	1,148041
0,6	0,147250	0,484561	21,819621	1,565177
0,7	0,171519	0,682229	21,404771	2,133310
0,8	0,208470	1,000789	20,765932	2,983081
0,9	0,275894	1,651630	19,560702	4,521723

Таблица 3.3.

Зависимости характеристик модели от увеличения настойчивости абонента в  
установлении соединения

$H$	$\pi_{1,2}$	$r_1$	$m_{p,1}$	$m_{r,1}$
0,90	0,275894	1,651633	19,560701	4,521725
0,91	0,286285	1,761501	19,368703	4,760226
0,92	0,297870	1,887438	19,152209	5,027166
0,93	0,310933	2,034012	18,904815	5,329696
0,94	0,325875	2,207959	18,617232	5,678100
0,95	0,343291	2,419790	18,275230	6,087983
0,96	0,364138	2,687253	17,855298	6,584858
0,97	0,390119	3,043957	17,314096	7,215189
0,98	0,424836	3,566628	16,556367	8,079691
0,99	0,479028	4,510007	15,287035	9,485183

Таблица 3.4.

Зависимости характеристик модели от увеличения настойчивости абонента в  
установлении соединения

$H$	$\pi_{2,2}$	$r_2$	$m_{p,2}$	$m_{r,2}$
0,0	0,286318	0,000000	3,568409	0,000000
0,1	0,304558	0,031412	3,523769	0,062670
0,2	0,325479	0,069628	3,471690	0,135746
0,3	0,349776	0,117235	3,409909	0,222354
0,4	0,378432	0,178374	3,335061	0,327135
0,5	0,412897	0,260158	3,241843	0,457368
0,6	0,455442	0,376018	3,121255	0,625351
0,7	0,509935	0,555100	2,956295	0,854205
0,8	0,583889	0,876564	2,708933	1,195361
0,9	0,696062	1,677059	2,262116	1,806184

Таблица 3.5.

Зависимости характеристик модели от увеличения настойчивости абонента в  
установлении соединения

$H$	$\pi_{2,2}$	$r_2$	$m_{p,2}$	$m_{r,2}$
0,90	0,696062	1,677060	2,262116	1,806184
0,91	0,711152	1,834054	2,193278	1,899772
0,92	0,727367	2,022767	2,116457	2,004079
0,93	0,744908	2,254835	2,029740	2,121666
0,94	0,764051	2,548717	1,930427	2,256153
0,95	0,785181	2,935803	1,814521	2,412899
0,96	0,808879	3,474744	1,675709	2,600386
0,97	0,836094	4,291310	1,503034	2,833361
0,98	0,868623	5,722710	1,274466	3,141584
0,99	0,910921	9,184546	0,931416	3,604718

### 3.5. Выводы

1. Иерархические сети доступа, в которых учитывается влияние поведения пользователей после получения отказа в обслуживании, являются сложным объектом для проведения исследований из-за наличия зависимости между последовательными поступлениями первичных и повторных заявок. В общем случае оценка характеристик возможна только с помощью достаточно обоснованных приближенных методов. Одним из них является подход, основанный на замене потоков повторных вызовов на пуассоновский с интенсивностью определяемой с помощью специальным образом составленных неявных уравнений. Переход к модели иерархической сети без повторных вызовов позволяет использовать для оценки характеристик

рекурсивный алгоритм, основанный на последовательной свертке векторов индивидуальных распределений вероятностей поступающих потоков трафика. Даны определения показателей качества обслуживания заявок, сформулированы основные этапы реализации алгоритма, получены необходимые расчетные выражения. Показано, что алгоритм может быть использован для оценки характеристик для любых значений структурных параметров модели.

2. Характеристики качества обслуживания заявок в иерархических сетях доступа с повторными вызовами могут быть найдены численными методами на основе составления и решения системы уравнений равновесия. Показано, что данный способ можно использовать для иерархических сетей доступа с двухэтапным процессом установления соединения. Приведено математическое описание модели, построен марковский процесс, описывающий изменение ее состояний, сформулированы определения для основных показателей качества обслуживания заявок через значения стационарных вероятностей модели. Получено выражение для системы уравнений равновесия в виде одного соотношения с коэффициентами, являющимися функциями компонентов состояния. Построенное представление системы уравнений равновесия позволяет использовать для ее решения итерационные методы. При этом количество неизвестных в системе может исчисляться несколькими миллионами. Этот результат позволяет вести оценку характеристик модели для большинства случаев интересных с точки зрения практических приложений.
3. Для реализации численных методов решения системы уравнений равновесия необходимо ограничить число неизвестных. Для этого обычно ограничивают максимально возможное число абонентов, одновременно повторяющих заявку на установление соединения. Проведенное численное исследование модели показало, что корректность выбора ограничений можно анализировать, оценивая степень малости величины вероятности пребывания модели в состояниях, когда на повторении находятся максимально

возможное число абонентов, повторяющих вызов.

4. Выполненное численное исследование модели показало существенную зависимость значений характеристик от величины настойчивости абонента к установлению соединения. Когда вероятность повторения вызова близка к единице, значение доли потерянных заявок, а также величины других характеристик модели могут в несколько раз превзойти значения аналогичных характеристик в ситуации, когда повторные вызовы не учитываются. Отсюда следует, что традиционные методики планирования пропускной способности звеньев иерархических сетей доступа, следует дополнить результатами, позволяющими учитывать эту особенность формирования входных потоков заявок. Решение сформулированной задачи будет получено в следующем разделе.

## Раздел 4

# Оценка скорости звеньев мультисервисной иерархической сети с учетом реакции абонента на отказ в обслуживании

### 4.1. Введение

Точная оценка характеристик мультисервисной иерархической сети с учетом влияния поведения пользователя на отказ в обслуживании возможна средствами имитационного моделирования или с помощью решения системы уравнений равновесия. Последний подход применим в ограниченной области изменения входных параметров модели и используется для анализа ее частных вариантов. В общем случае для расчета характеристик остается применение приближенных алгоритмов. Для моделей с учетом влияния повторных вызовов приближенные алгоритмы часто строятся с использованием асимптотических выражений для характеристик, полученных при стремлении интенсивности повторения заявок либо к бесконечности, либо к нулю. В каждом из этих случаев для оценки характеристик исходной модели используется модель иерархической сети доступа, но без учета влияния повторных вызовов. В подразделе 4.2 будет рассмотрен подход, основанный на предположении о стремлении интенсивности повторения к бесконечности, а в подразделе 4.3 — к нулю. Построенные алгоритмы положены в основу методики оценки скорости звеньев мультисервисной иерархической сети с учетом влияния повторных вызовов, исследованной в подразделе 4.4. В подразделе 4.5 сформулированы выводы по результатам четвертого раздела.



## 4.2. Оценка характеристик иерархической сети для больших значений интенсивности повторения вызова

### 4.2.1. Предпосылки

Зафиксируем номер потока  $k$ . Устремим значение  $\gamma_k$  интенсивности поступления повторных вызовов от одного абонента к бесконечности. Напомним, что выполняется предположение  $H_{k,2} < 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . В анализируемой ситуации абонент в повторной попытке соединения с вероятностью, стремящейся к единице, покинет систему не дождавшись обслуживания. Таким образом, при  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , выполняется асимптотическое соотношение

$$r_k \gamma_k = r_{k,b} \gamma_k + o(1); \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.1)$$

Здесь и далее величина  $o(1)$  означает выражение, стремящееся к нулю при  $\gamma_k \rightarrow \infty$ .

В рассматриваемых предельных условиях поступление повторных заявок не оказывает никакого влияния на процесс занятия каналов. Величину  $\pi_{k,1}$  доли времени недоступности маршрута следования трафика  $k$ -го потока для приема заявок соответствующего потока можно рассчитать с помощью частного случая исследуемой модели мультисервисной иерархической сети, когда в ней отсутствуют абоненты, повторяющие вызов. Этот частный случай получается, если положить вероятности повторения вызова  $H_{k,1}$  и  $H_{k,2}$  равными нулю,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Обозначим в рассматриваемом частном через  $\pi_k$  величину доли времени пребывания модели в состоянии, когда хотя бы на одной из линий  $k$ -го маршрута нет достаточной пропускной способности для обслуживания поступившей заявки  $k$ -го потока. Выполняется соотношение  $\lim_{\gamma_k \rightarrow \infty, k=1,2,\dots,n} \pi_{k,1} = \pi_k$ .

Асимптотические формулы для оценки характеристик в анализируемой области изменения входных параметров можно найти с помощью законов сохранения (2.3), имеющих вид

$$r_k \gamma_k = \lambda_k \pi_{k,1} H_{k,1} + r_{k,b} \gamma_k H_{k,2}, \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4.2)$$

Подставим (4.1) в (4.2) и рассмотрим полученное выражение в условиях, когда  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Получаем соотношение

$$r_k \gamma_k = \frac{\lambda_k \pi_k H_{k,1}}{1 - H_{k,2}}; \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4.3)$$

Воспользовавшись определением, (4.1) и (4.3), получаем при  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k=1,2,\dots,n$  соотношения

$$\Lambda_{k,b} = \lambda_k \pi_k + r_{k,b} \gamma_k + o(1) = \pi_k \frac{\lambda_k (1 - H_{k,2} + H_{k,1})}{1 - H_{k,2}} + o(1); \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4.4)$$

#### 4.2.2. Расчетные выражения для характеристик

Воспользуемся асимптотическими выражениями, полученными в предыдущем подразделе, определениями характеристик, сформулированными в подразделе 2.2.7, и найдем расчетные формулы для характеристик исследуемой модели в анализируемой области изменения входных параметров, когда  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k=1,2,\dots,n$ .

Для оценки доли первичных и повторных заявок  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , получаем такое асимптотическое выражение

$$\pi_{k,2} = \frac{\Lambda_{k,b}}{\lambda_k + r_k \gamma_k} = \frac{\pi_k (1 - H_{k,2} + H_{k,1})}{1 - H_{k,2} + \pi_k H_{k,1}} + o(1).$$

Выражения для оценки среднего числа канальных единиц занятых на обслуживание заявок  $k$ -го потока и среднего числа заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , находящихся на обслуживании, совпадают с выражениями для оценки аналогичных характеристик иерархической модели сети с потерями заявок и имеют вид

$$m_k = \lambda_k b_k (1 - \pi_k) + o(1); \quad y_k = \lambda_k (1 - \pi_k) + o(1).$$

Величина среднего числа абонентов, формирующих  $k$ -й поток трафика и находящихся в состоянии повторения заявки, среднего числа абонентов, формирующих  $k$ -й поток трафика и находящихся в состоянии повторения заявки в момент недостаточности ресурса передачи информации в одной из линий маршрута следования трафика  $k$ -го потока, стремятся к нулю при  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Таким образом, выполняются соотношения

$$r_k = o(1), \quad r_{k,b} = o(1).$$

Выражение для оценки доли повторных заявок в общем потоке заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , имеет вид

$$\pi_{k,3} = \frac{\pi_k H_{k,1}}{1 - H_{k,2} + \pi_k H_{k,1}} + o(1).$$

Выражение для оценки среднего числа повторных вызовов  $k$ -го потока на один первичный вызов  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , записывается следующим образом

$$f_k = \frac{\pi_k H_{k,1}}{1 - H_{k,2}} + o(1).$$

Выражение для оценки среднего числа отказов в единицу времени первичных и повторных заявок  $k$ -го потока на одно установленное соединение для заявок  $k$ -го потока имеет вид

$$Q_k = \frac{\Lambda_{k,b}}{y_k} = \frac{\pi_k (1 - H_{k,2} + H_{k,1})}{(1 - \pi_k)(1 - H_{k,2})} + o(1).$$

Выражение для оценки доли первичных и повторных заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , прекративших попытки соединения и покинувших систему связи не дождавшись начала обслуживания записывается следующим образом

$$\pi_{k,4} = \frac{\pi_{k,1}(1 - H_{k,1}) + r_{k,b}\gamma_k(1 - H_{k,2})}{\lambda_k} = \pi_k + o(1).$$

Выражение для оценки интенсивности первичных и повторных вызовов  $k$ -го потока, получивших отказ из-за недостаточности ресурса передачи информации, задано соотношением (4.4). Выражение для оценки интенсивности первичных и

повторных вызовов  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , имеет вид

$$\Lambda_k = \lambda_k + r_k \gamma_k = \lambda_k \left(1 + \frac{\pi_k H_{k,1}}{1 - H_{k,2}}\right) + o(1).$$

Полученные соотношения могут быть использованы для оценки значений характеристик модели в области больших значений  $\gamma_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Исследуем погрешность оценки характеристик.

### 4.2.3. Погрешность оценки характеристик

Рассмотрим модель звена со следующими фиксированными значениями входных параметров:  $v=50$  к.е.;  $\mu_1=1$ ;  $\mu_2=1$ ;  $b_1=1$  к.е.;  $b_2=5$  к.е.;  $v_1=30$  к.е.;  $v_2=40$  к.е.;  $\lambda_1=v/2b_1$ ;  $\lambda_2=v/2b_2$ ;  $H_{1,1}=H_{2,1}=H_{1,2}=H_{2,2}=0,7$  и исследуем погрешность оценки основных характеристик качества обслуживания поступающих заявок, введенных в подразделе 2.2.7, с помощью асимптотических выражений, полученных для этих же характеристик в подразделе 4.2.2 при  $\gamma_k \rightarrow \infty$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Численные данные представлены в таблицах 4.1-4.4. Для удобства сравнения приближенные значения характеристик обозначены теми же символами, что и точные значения только со знаком \* сверху.

Полученные результаты говорят о том, что асимптотические выражения, обладают неплохой точностью (в большинстве случаев относительная погрешность оценки 20-30%). Поскольку среднее время между последовательными повторными вызовами обычно определяется временем установления соединения, то увеличение интенсивности повторения характерно для систем связи с малым временем установления соединения или автоматизированной функцией повторения заблокированной заявки. В этих условиях можно использовать полученные соотношения для оценки характеристик качества обслуживания, поступающих заявок с учетом поведения пользователя, получившего отказ. Если среднее время между последовательными повторными попытками увеличивается, то здесь рекомендуется использовать

Таблица 4.1.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при больших значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$\pi_{1,2}$	$\pi_{1,2}^*$	$m_1$	$m_1^*$	$\pi_{1,3}$	$\pi_{1,3}^*$	$f_1$	$f_1^*$
30	0,1623	0,1966	23,0921	22,8983	0,0931	0,1229	0,1027	0,1401
40	0,1665	0,1966	23,0649	22,8983	0,0966	0,1229	0,1069	0,1401
50	0,1696	0,1966	23,0452	22,8983	0,0992	0,1229	0,1101	0,1401
60	0,1721	0,1966	23,0301	22,8983	0,1012	0,1229	0,1127	0,1401
70	0,1741	0,1966	23,0180	22,8983	0,1030	0,1229	0,1148	0,1401
80	0,1757	0,1966	23,0082	22,8983	0,1044	0,1229	0,1166	0,1401
90	0,1772	0,1966	22,9999	22,8983	0,1056	0,1229	0,1181	0,1401
100	0,1784	0,1966	22,9929	22,8983	0,1067	0,1229	0,1194	0,1401
500	0,1913	0,1966	22,9240	22,8983	0,1180	0,1229	0,1338	0,1401
1000	0,1938	0,1966	22,9118	22,8983	0,1203	0,1229	0,1367	0,1401

Таблица 4.2.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при больших значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$\pi_{2,2}$	$\pi_{2,2}^*$	$m_2$	$m_2^*$	$\pi_{2,3}$	$\pi_{2,3}^*$	$f_2$	$f_2^*$
30	0,4835	0,5169	18,2324	17,8421	0,2918	0,3230	0,4119	0,4772
40	0,4887	0,5169	18,1717	17,8421	0,2966	0,3230	0,4217	0,4772
50	0,4924	0,5169	18,1289	17,8421	0,3000	0,3230	0,4286	0,4772
60	0,4952	0,5169	18,0968	17,8421	0,3026	0,3230	0,4339	0,4772
70	0,4973	0,5169	18,0716	17,8421	0,3046	0,3230	0,4381	0,4772
80	0,4991	0,5169	18,0513	17,8421	0,3063	0,3230	0,4415	0,4772
90	0,5005	0,5169	18,0345	17,8421	0,3076	0,3230	0,4443	0,4772
100	0,5017	0,5169	18,0204	17,8421	0,3088	0,3230	0,4467	0,4772
500	0,5128	0,5169	17,8901	17,8421	0,3192	0,3230	0,4689	0,4772
1000	0,5147	0,5169	17,8676	17,8421	0,3210	0,3230	0,4728	0,4772

Таблица 4.3.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при больших значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$Q_1$	$Q_1^*$	$\pi_{1,4}$	$\pi_{1,4}^*$	$\Lambda_{1,b}$	$\Lambda_{1,b}^*$	$\Lambda_1$	$\Lambda_1^*$
30	0,1938	0,2448	0,0763	0,0841	4,4749	5,6047	27,5671	28,5029
40	0,1997	0,2448	0,0774	0,0841	4,6069	5,6047	27,6718	28,5029
50	0,2042	0,2448	0,0782	0,0841	4,7069	5,6047	27,7521	28,5029
60	0,2078	0,2448	0,0788	0,0841	4,7863	5,6047	27,8164	28,5029
70	0,2108	0,2448	0,0793	0,0841	4,8513	5,6047	27,8693	28,5029
80	0,2132	0,2448	0,0797	0,0841	4,9058	5,6047	27,9139	28,5029
90	0,2153	0,2448	0,0800	0,0841	4,9523	5,6047	27,9522	28,5029
100	0,2171	0,2448	0,0803	0,0841	4,9925	5,6047	27,9854	28,5029
500	0,2365	0,2448	0,0830	0,0841	5,4218	5,6047	28,3458	28,5029
1000	0,2403	0,2448	0,0835	0,0841	5,5067	5,6047	28,4185	28,5029

Таблица 4.4.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при больших значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$Q_2$	$Q_2^*$	$\pi_{2,4}$	$\pi_{2,4}^*$	$\Lambda_{2,b}$	$\Lambda_{2,b}^*$	$\Lambda_2$	$\Lambda_2^*$
30	0,9360	1,0698	0,2707	0,2863	3,4133	3,8176	7,0597	7,3860
40	0,9559	1,0698	0,2731	0,2863	3,4740	3,8176	7,1084	7,3860
50	0,9701	1,0698	0,2748	0,2863	3,5174	3,8176	7,1432	7,3860
60	0,9809	1,0698	0,2761	0,2863	3,5503	3,8176	7,1696	7,3860
70	0,9894	1,0698	0,2771	0,2863	3,5762	3,8176	7,1905	7,3860
80	0,9964	1,0698	0,2779	0,2863	3,5972	3,8176	7,2074	7,3860
90	1,0021	1,0698	0,2786	0,2863	3,6146	3,8176	7,2215	7,3860
100	1,0070	1,0698	0,2792	0,2863	3,6293	3,8176	7,2333	7,3860
500	1,0527	1,0698	0,2844	0,2863	3,7666	3,8176	7,3446	7,3860
1000	1,0607	1,0698	0,2853	0,2863	3,7905	3,8176	7,3640	7,3860

другие асимптотические выражения, которые также приводят к использованию модели с потерями, но с увеличенной интенсивностью поступления первичных вызовов. Она будет исследована в следующем подразделе.

### **4.3. Оценка характеристик иерархической сети для малых значений интенсивности повторения вызова**

#### **4.3.1. Предпосылки**

Рассмотрим другую предельную ситуацию. Будем предполагать, что длительность интервала времени между последовательными повторными вызовами, поступающими от одного абонента, стремится к бесконечности, т.е. анализируется поведение характеристик качества обслуживания поступающих заявок при  $\gamma_k \rightarrow 0$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Известно [89,114], что в этом случае поток повторных вызовов по свойствам приближается к пуассоновскому с интенсивностью, величина которой определяется из решения специальным образом составленного неявного уравнения. Достоинством данного подхода является то обстоятельство, что при его реализации необходимо рассчитать значения характеристик анализируемой модели мультисервисной иерархической сети доступа, но без учета влияния повторных вызовов. Для решения этой задачи развит эффективный численный алгоритм, который изложен в подразделе 3.2.

Назовем используемую в процессе счета модель иерархической сети вспомогательной и приведем ее схему функционирования. Обозначим через  $n$  общее число поступающих потоков заявок, через  $\lambda_k$  обозначим интенсивность поступления первичных заявок в потоке с номером  $k$ , а через  $x_k$  обозначим интенсивность поступления повторных запросов в этом же потоке,  $k=1,2,\dots,n$ . Предполагается, что поступление первичных и повторных запросов подчиняется пуассоновскому закону с соответствующей интенсивностью. Для обслуживания поступившей заявки требуется предоставить ресурс передачи в количестве  $b_k$

канальных единиц в каждой из соединительных линий, составляющих маршрут движения трафика, относящегося к обслуживанию рассматриваемой заявки. Этот объем канального ресурса занимает в течение промежутка времени передачи трафика сервиса реального времени, ассоциированного с обслуживанием заявки  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Будем предполагать, что это время имеет экспоненциальное распределение с параметром  $\mu_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Маршруты движения трафика задаются маршрутной матрицей  $R$ .

Вектор состояния вспомогательной модели сети имеет вид  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Потоки трафика, имеющие доступ к  $j$ -й линии, не могут использовать в совокупности более, чем  $v_j$  канальных единиц  $j$ -го звена сети. Отсюда следуют границы пространства состояний  $S$  вспомогательной модели. Состояние  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  принадлежит множеству  $S$ , если справедливы соотношения

$$\sum_{k \in N_j} i_k b_k \leq v_j, \quad j = 1, 2, \dots, J.$$

Через  $U_k$  обозначим множество состояний  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  в каждом из которых поступившая заявка  $k$ -го потока получает отказ из-за недостаточности ресурса передачи в каком-то из звеньев  $k$ -го маршрута. Все состояния, входящие во множество  $U_k$  формируются из состояний  $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in S$  и дополнительно удовлетворяют условию

$$U_k = (i_1, \dots, i_{k-1}, i_k + 1, i_{k+1}, \dots, i_n) \notin S. \quad (4.5)$$

Изменение состояний модели описывается марковским процессом  $r(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t))$ , определенном на конечном пространстве состояний  $S$ , где  $i_k(t)$  — число заявок  $k$ -го потока,  $k = 1, 2, \dots, n$ , находящихся на обслуживании в момент времени  $t$ . Обозначим через  $P(i_1, i_2, \dots, i_n)$  значение стационарных вероятностей состояния  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$ . Доля потерянных заявок  $\pi_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , оценивается из выражения

$$\pi_k = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_n) \in U_k} P(i_1, i_2, \dots, i_n), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.6)$$



### 4.3.2. Расчетные выражения для характеристик

Обозначим оценки характеристик исходной модели, полученные с использованием характеристик вспомогательной модели, теми же символами только со знаком \* вверху. Доля времени недоступности маршрута следования трафика  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , для обслуживания заявок анализируемого потока, оценивается из выражения

$$\pi_{k,1}^* = \pi_k.$$

Доля первичных и повторных заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , получивших отказ, находится из соотношения

$$\pi_{k,2}^* = \pi_k.$$

Среднее число канальных единиц занятых на обслуживание заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , определяется из выражения

$$m_k^* = (\lambda_k + x_k) b_k (1 - \pi_k).$$

Среднее число заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$  находящихся на обслуживании, рассчитывается из соотношения

$$y_k^* = (\lambda_k + x_k) (1 - \pi_k).$$

Среднее число абонентов, повторяющих вызов, для  $k$ -го потока трафика,  $k=1,2,\dots,n$ , оценивается из формулы

$$r_k^* = \frac{x_k}{\gamma_k}.$$

Среднее число абонентов, формирующих  $k$ -й поток трафика,  $k=1,2,\dots,n$ , и находящихся в состоянии повторения заявки в момент недостаточности ресурса передачи информации, определяется из выражения

$$r_{k,b}^* = \frac{x_k \pi_k}{\gamma_k}.$$

Доля повторных заявок в общем потоке заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , оценивается из формулы

$$\pi_{k,3}^* = \frac{x_k}{\lambda_k + x_k}.$$

Среднее число повторных вызовов  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , на один первичный вызов  $k$ -го потока, рассчитывается из соотношения

$$f_k^* = \frac{x_k}{\lambda_k}.$$

Среднее число отказов в единицу времени первичных и повторных заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , на одно установленное соединение для заявок  $k$ -го потока, определяется из выражения

$$Q_k^* = \frac{\pi_k}{1 - \pi_k}.$$

Доля первичных и повторных заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , прекративших попытку соединения и покинувших систему связи не дождавшись начала обслуживания, оценивается из формулы

$$\pi_{k,4}^* = \frac{\lambda_k \pi_k (1 - H_{k,1}) + x_k \pi_k (1 - H_{k,2})}{\lambda_k}.$$

Интенсивность первичных и повторных вызовов  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , получивших отказ, рассчитывается из соотношения

$$\Lambda_{k,b}^* = (\lambda_k + x_k) \pi_k.$$

Интенсивность первичных и повторных вызовов  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ , оценивается из формулы

$$\Lambda_k^* = \lambda_k + x_k.$$

### 4.3.3. Неявные уравнения и их решение

Все введенные оценки зависят от неизвестных значений  $x_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , интенсивностей поступления повторных запросов. Для их оценки в соответствии с [89] составим систему неявных уравнений, потребовав для введенных оценок

выполнения соотношений (2.3). Получаем равенства

$$\begin{aligned} x_k &= \lambda_k \pi_k H_{k,1} + x_k \pi_k H_{k,2}; \\ \lambda_k + x_k &= \lambda_k \pi_k + x_k \pi_k + y_k^* \mu_k; \quad k=1,2,\dots,n. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Второе из приведенных выражений выполняется для всех  $x_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  а первое — дает систему неявных уравнений для определения значений  $x_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ .

$$x_k = \frac{\lambda_k \pi_k H_{k,1}}{1 - \pi_k H_{k,2}}; \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4.8)$$

Для решения системы неявных уравнений предлагается использовать следующий алгоритм:

1. Обозначим через  $x_k^{(s)}$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , последовательность приближений  $s=1,2,\dots$ , к искомой величине  $x_k$ . Величина  $\pi_k$  зависит от неизвестного значения  $x_k$ . Укажем эту зависимость в следующем виде  $\pi_k(x_1, \dots, x_n)$ .

2. Выберем начальное приближение из условия

$$x_k^{(0)} = 0, \quad k=1,2,\dots,n.$$

3. Установим связь между  $(s+1)$ -ым и  $s$ -ым приближениями, воспользовавшись рекурсивным соотношением

$$x_k^{(s+1)} = \frac{\lambda_k \pi_k(x_1^{(s)}, \dots, x_n^{(s)}) H_{k,1}}{1 - \pi_k(x_1^{(s)}, \dots, x_n^{(s)}) H_{k,2}}; \quad k=1,2,\dots,n. \quad (4.9)$$

4. Реализуем сформулированную рекурсию пока относительная разность между последовательными значениями  $x_k^{(s+1)}$  и  $x_k^{(s)}$ ,  $k=1,2,\dots,n$ , не станет меньше заданной наперед малой величины, например,  $10^{-8}$ .

#### 4.3.4. Погрешность оценки характеристик

Приведем численные примеры, иллюстрирующие погрешность предложенного метода оценки характеристик исследуемой модели иерархической

сети доступа. Рассмотрим модель звена сети со следующими фиксированными значениями входных параметров:  $v = 50$  к.е.;  $\mu_1 = 1$ ;  $\mu_2 = 1$ ;  $b_1 = 1$  к.е.;  $b_2 = 5$  к.е.;  $v_1 = 30$  к.е.;  $v_2 = 40$  к.е.;  $\lambda_1 = v/2b_1$ ;  $\lambda_2 = v/2b_2$   $H_{1,1} = H_{2,1} = H_{1,2} = H_{2,2} = 0,9$  и исследуем погрешность оценки основных характеристик качества обслуживания поступающих заявок, введенных в подразделе 2.2.7, с помощью асимптотических выражений, полученных для этих же характеристик в подразделе 4.3.3 при  $\gamma_k \rightarrow 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Численные данные, иллюстрирующие погрешность приближенного расчета, представлены в таблицах 4.5-4.8. Для удобства сравнения характеристик их приближенные величины обозначены теми же символами, что и точные значения только со знаком \* вверху.

Результаты численных расчетов говорят о неплохой точности приближенной оценки характеристик (в большинстве случаев относительная погрешность оценки 10-25%). Понятно, что она повышается при малых значениях интенсивности повторения вызова. В целом погрешность этого способа вычисления характеристик мультисервисной модели иерархической сети доступа выше, чем при использовании подхода, основанного на асимптотических выражениях при больших значениях интенсивности повторения. Область применения рассматриваемого алгоритма — оценка характеристик в ситуации, когда абонент задерживает посылку повторного вызова, ожидая, что ситуация локальной перегрузки сети, которая привела к появлению повторного вызова, изменится в лучшую сторону. Данный подход более трудоемок, чем метод рассмотренный в подразделе 4.2.3. При его реализации необходимо рассчитать характеристики мультисервисной модели иерархической сети доступа без учета повторных вызовов для некоторой сходящейся последовательности значений  $x^{(k)}$ . Для расчета характеристик используется алгоритм свертки, изложенный в подразделе 3.2.

Таблица 4.5.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при малых значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$\pi_{1,2}$	$\pi_{1,2}^*$	$m_1$	$m_1^*$	$\pi_{1,3}$	$\pi_{1,3}^*$	$f_1$	$f_1^*$
20	0,2581	0,1534	23,3747	23,8015	0,2065	0,1108	0,2603	0,1246
10	0,2273	0,1534	23,4767	23,8015	0,1775	0,1108	0,2153	0,1246
7	0,2137	0,1534	23,5260	23,8015	0,1645	0,1108	0,1969	0,1246
5	0,2025	0,1534	23,5693	23,8015	0,1541	0,1108	0,1822	0,1246
4	0,1959	0,1534	23,5962	23,8015	0,1481	0,1108	0,1738	0,1246
3	0,1884	0,1534	23,6282	23,8015	0,1413	0,1108	0,1645	0,1246
2	0,1795	0,1534	23,6681	23,8015	0,1333	0,1108	0,1539	0,1246
1	0,1685	0,1534	23,7213	23,8015	0,1237	0,1108	0,1411	0,1246
0,5	0,1617	0,1534	23,7565	23,8015	0,1178	0,1108	0,1335	0,1246
0,1	0,1552	0,1534	23,7915	23,8015	0,1123	0,1108	0,1265	0,1246

Таблица 4.6.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при малых значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$\pi_{2,2}$	$\pi_{2,2}^*$	$m_2$	$m_2^*$	$\pi_{2,3}$	$\pi_{2,3}^*$	$f_2$	$f_2^*$
20	0,6657	0,4970	19,1106	20,4905	0,5626	0,3863	1,2864	0,6294
10	0,6327	0,4970	19,4362	20,4905	0,5276	0,3863	1,1168	0,6294
7	0,6150	0,4970	19,5973	20,4905	0,5089	0,3863	1,0361	0,6294
5	0,5984	0,4970	19,7410	20,4905	0,4914	0,3863	0,9661	0,6294
4	0,5876	0,4970	19,8305	20,4905	0,4801	0,3863	0,9234	0,6294
3	0,5743	0,4970	19,9375	20,4905	0,4662	0,3863	0,8734	0,6294
2	0,5572	0,4970	20,0703	20,4905	0,4484	0,3863	0,8128	0,6294
1	0,5335	0,4970	20,2441	20,4905	0,4239	0,3863	0,7358	0,6294
0,5	0,5175	0,4970	20,3553	20,4905	0,4074	0,3863	0,6876	0,6294
0,1	0,5016	0,4970	20,4613	20,4905	0,3910	0,3863	0,6421	0,6294

Таблица 4.7.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при малых значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$Q_1$	$Q_1^*$	$\pi_{1,4}$	$\pi_{1,4}^*$	$\Lambda_{1,b}$	$\Lambda_{1,b}^*$	$\Lambda_1$	$\Lambda_1^*$
20	0,3479	0,1812	0,0650	0,0479	8,1320	4,3136	31,5067	28,1151
10	0,2942	0,1812	0,0609	0,0479	6,9068	4,3136	30,3835	28,1151
7	0,2718	0,1812	0,0590	0,0479	6,3954	4,3136	29,9213	28,1151
5	0,2539	0,1812	0,0572	0,0479	5,9851	4,3136	29,5545	28,1151
4	0,2437	0,1812	0,0562	0,0479	5,7492	4,3136	29,3454	28,1151
3	0,2321	0,1812	0,0549	0,0479	5,4843	4,3136	29,1125	28,1151
2	0,2188	0,1812	0,0533	0,0479	5,1782	4,3136	28,8463	28,1151
1	0,2027	0,1812	0,0511	0,0479	4,8072	4,3136	28,5285	28,1151
0,5	0,1929	0,1812	0,0497	0,0479	4,5820	4,3136	28,3385	28,1151
0,1	0,1837	0,1812	0,0483	0,0479	4,3716	4,3136	28,1631	28,1151

Таблица 4.8.

Точный и приближенный расчет характеристик модели при малых значениях интенсивности повторения вызова

$\gamma$	$Q_2$	$Q_2^*$	$\pi_{2,4}$	$\pi_{2,4}^*$	$\Lambda_{2,b}$	$\Lambda_{2,b}^*$	$\Lambda_2$	$\Lambda_2^*$
20	1,9910	0,9880	0,2356	0,1804	7,6097	4,0491	11,4318	8,1472
10	1,7228	0,9880	0,2226	0,1804	6,6968	4,0491	10,5841	8,1472
7	1,5974	0,9880	0,2161	0,1804	6,2611	4,0491	10,1805	8,1472
5	1,4898	0,9880	0,2104	0,1804	5,8821	4,0491	9,8303	8,1472
4	1,4249	0,9880	0,2068	0,1804	5,6511	4,0491	9,6172	8,1472
3	1,3491	0,9880	0,2025	0,1804	5,3796	4,0491	9,3671	8,1472
2	1,2581	0,9880	0,1972	0,1804	5,0502	4,0491	9,0642	8,1472
1	1,1436	0,9880	0,1902	0,1804	4,6302	4,0491	8,6790	8,1472
0,5	1,0727	0,9880	0,1858	0,1804	4,3670	4,0491	8,4381	8,1472
0,1	1,0063	0,9880	0,1815	0,1804	4,1180	4,0491	8,2103	8,1472

## 4.4. Оценка скорости звеньев иерархической сети

### 4.4.1. Предпосылки

Рассмотрим исследуемую модель иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов и построим процедуру оценки скорости звеньев сети достаточной для обслуживания поступающих потоков трафика с заданными показателями. Структурные параметры модели, описание процесса изменения ее состояний приведены в подразделе 2.2. Будем предполагать, что из результатов маркетинговых исследований известны значения  $\lambda_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  интенсивностей поступления первичных вызовов. Если же даны результаты измерений  $\Lambda_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  общей интенсивности поступления первичных вызовов и повторных и  $\pi_{k,2}$ ,  $k=1,2,\dots,n$  общей доли потерянных вызовов, то для оценки интенсивности первичных вызовов можно воспользоваться соотношениями, полученными в подразделе 2.3.2. В [89] показано, что при известных значениях интенсивности поступления первичных вызовов оценку требуемой скорости звеньев сети можно вести в рамках модели с явными потерями вызовов, без учета возможности их повторения. Построим соответствующую процедуру.

Для оценки характеристик потерь заявок в иерархической сети с потерями можно использовать точный метод, основанный на реализации процедуры свертки. Он изложен в подразделе 3.3.3. Однако при решении задачи оценки требуемой скорости звеньев иерархической сети более удобно использовать приближенный алгоритм, основанный на процедуре просеивания поступающих потоков заявок. Поскольку при его реализации также находятся потери заявок на отдельных звеньях маршрута следования трафика. Это дает возможность определять звенья с недостаточной пропускной способностью и увеличивать на них каналный ресурс. Приведем краткое описание метода просеивания заявок и изложим основные шаги процедуры оценки скорости звеньев сети.

#### 4.4.2. Метод просеивания заявок

Рассмотрим мультисервисную иерархическую сеть доступа, описание которой приведено в подразделе 2.2. В изложении метода просеивания заявок будет использоваться алгоритм оценки характеристик мультисервисной модели Эрланга. Приведем основные расчетные формулы [86]. Обозначим через  $\nu$  скорость мультисервисной линии, выраженную в единицах канального ресурса. Пусть  $n$  — общее число поступающих потоков заявок, а  $a_k$  — интенсивность поступления заявок для  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ . Предполагается, что поступление заявок подчиняется пуассоновскому закону. Для обслуживания заявок  $k$ -го потока требуется предоставить ресурс передачи в количестве  $b_k$  канальных единиц. Время обслуживания заявки любого потока имеет экспоненциальное распределение с параметром равным единице, таким образом интенсивности поступления заявок выражены в эрлангах.

Обозначим через  $P(i)$  вероятность занятости  $i$  канальных единиц. Для оценки  $P(i)$ , а с ними и значений доли потерянных заявок каждого потока используется рекурсивное соотношение

$$P(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^n a_k b_k P(i - b_k), \quad i = 0, 1, \dots, \nu, \quad (4.10)$$

где  $P(0) = 1$ . Значения вероятностей находятся после реализации рекурсии (4.10) и нормировки.

Применение метода просеивания заявок основано на предположении о независимости потерь заявок на отдельных звеньях сети. Это позволяет использовать для оценки потерь  $\pi_k$  формулу:

$$\pi_k = 1 - \prod_{j \in R_k} (1 - B_{k,j}), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (4.11)$$

где  $B_{k,j}$  — доля потерянных заявок  $k$ -го потока на  $j$ -ом звене сети, рассчитываемая после реализации рекурсии (4.10).

Воспользовавшись результатами [86,152] приведём основные расчётные



формулы. Отдельное  $j$ -ое мультисервисное звено сети, используемое в процессе реализации метода просеивания заявок, имеет следующие параметры: число канальных единиц —  $v_j$ , интенсивности поступления заявок, выраженные в Эрлангах, —  $a_{l,j}$ , а  $l \in N_j$  — номер информационного потока, проходящего через  $j$ -е звено сети. Для вычисления  $B_{k,j}$  используется формула [86,152]

$$B_{k,j} = \sum_{i=v_j-b_k+1}^{v_j} P(i), \quad k \in N_j, \quad (4.12)$$

где вероятности  $P(i)$  определяются из рекурсивных соотношений (4.10).

Вероятность  $B_{k,j}$  зависит от параметров  $j$ -го звена сети. Эту зависимость можно представить в форме функции  $G_{k,j}(v_j; (a_{l,j}; b_l), l \in N_j)$ . Для определения  $B_{k,j}$  необходимо решить систему неявных уравнений

$$B_{k,j} = G_{k,j}(v_j; (a_{l,j} \prod_{u \in R_l \setminus \{j\}} (1 - B_{l,u}); b_l), l \in N_j), \quad (4.13)$$

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

Система неявных уравнений (4.13) решается с использованием рекурсивной зависимости

$$B_{k,j}^{(s)} = G_{k,j}(v_j; (a_{l,j} \prod_{u \in R_l \setminus \{j\}} (1 - B_{l,u}^{(s,s-1)}); b_l), l \in N_j), \quad (4.14)$$

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

Начальное приближение выбирается из условия

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

Итерационный цикл заканчивается, когда относительная погрешность изменения рассчитываемых вероятностей становится меньше некоторой малой величины, например,  $10^{-8}$ .

Воспользуемся построенным алгоритмом для решения задачи об оценке скорости звеньев мультисервисной иерархической сети доступа.

#### 4.4.3. Алгоритм оценки скорости звеньев

Требуется найти значения  $v_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$  скорости звеньев мультисервисной иерархической сети доступа. Заданными параметрами сети являются величины  $a_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  предложенного трафика, выраженные в эрлангах; значения  $b_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  ресурса передачи информации, выраженные в канальных единицах; маршрутная матрица  $R$  и требуемые значения  $\pi_k$  доли потерянных заявок  $k$ -го потока,  $k=1,2,\dots,n$ . Также известными являются параметры поведения абонента, формирующего заявки  $k$ -го потока и получившего отказ в обслуживании. Это вероятности  $H_{k,1}$  и  $H_{k,2}$  повторения вызова после получения отказа соответственно в первичной и повторной попытках соединения, а также интенсивность повторения вызова  $\gamma_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ .

Оценка скорости звеньев будет выполнена рекурсивным методом. Для выполнения рекурсии требуется указать исходные параметры сети; процедуру оценки интенсивностей предложенного трафика  $a_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ ; способ оценки начальных величин ресурса передачи  $v_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$  и других исходных параметров модели; а также сформировать алгоритм перехода к следующему шагу рекурсии и определить критерий её завершения. Перечислим шаги алгоритма.

1. Определяются исходные и целевые параметры сети. Это значения:  $\pi_k$ ,  $b_k$ ,  $H_{k,1}$ ,  $H_{k,2}$ ,  $\gamma_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  и компоненты маршрутной матрицы  $R$ .
2. Интенсивности предложенного трафика могут быть заданы заранее из результатов маркетинговых исследований. Обычно такая ситуация наблюдается при строительстве новой сети. Если речь идет о расширении уже существующей сети, то значения  $a_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  можно найти из формул, полученных в подразделе 2.3.2, по измеренным значениям  $\Lambda_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  общей интенсивности поступления первичных вызовов и

повторных,  $\pi_{k,2}$ ,  $k=1,2,\dots,n$  доли потерянных первичных и повторных вызовов или значениям  $y_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  среднего числа заявок, находящихся на обслуживании.

3. Начальные значения скоростей звеньев сети  $v_j^{(0)}$ ,  $j=1,2,\dots,J$ , либо известны заранее, либо определяются как целая часть интенсивности предложенного трафика, проходящего через анализируемое звено сети [96]

$$v_j^{(0)} = \left\lfloor \sum_{l \in N_j} a_l b_l \right\rfloor, \quad j=1,2,\dots,J. \quad (4.15)$$

4. Необходимо выбрать процедуру оценки характеристик, определяющих достаточность ресурса звеньев сети. В рассматриваемом случае это величины доли потерянных заявок  $\pi_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$ . Поскольку требуемые значения  $\pi_k$  малы, то оценку скорости звеньев сети можно вести в рамках модели с явными потерями вызовов, без учета возможности их повторения. Этот результат установлен в [86]. Подбор скорости звеньев будет вестись с помощью метода просеивания заявок (см. подраздел 4.4.2), а оценка достаточности ресурса будет осуществляться с помощью имитационного моделирования (см. подраздел 3.2.5). Выбор метода просеивания заявок объясняется тем, что при его реализации совместно с величиной  $\pi_k$  также находятся и значения  $B_{k,j}$  потерь заявок на всех звеньях  $k$ -го маршрута. Если  $\pi_k$  максимальная величина потерь, превосходит требуемое значение, то далее находится звено  $j$   $k$ -го маршрута с максимальным значением потерь  $B_{k,j}$  и происходит увеличение его скорости на некоторую заранее выбранную величину. С увеличением скорости звеньев будут уменьшаться текущие значения потерь заявок  $\pi_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  и за конечное число шагов будет найдено решение удовлетворяющее условию

$$\max_{1 \leq k \leq n} \pi_k \leq \pi, \quad (4.16)$$

где  $\pi$  — заданная верхняя граница потерь поступающих заявок.

Приемлемость полученного решения требуется проверять результатами точного расчета  $\pi_k$ ,  $k=1,2,\dots,n$  с использованием алгоритма свертки или имитационного моделирования. Среди множества решений, удовлетворяющих (4.16), найденное решение может не быть оптимальным по критерию стоимости, а быть лишь близким к нему. Анализ этой ситуации требует привлечения экономических аспектов планирования сети и здесь не исследуется.

Рассмотрим численный пример, иллюстрирующий применение введенного алгоритма. Для проведения вычислений используется иерархическая сеть доступа, изображенная на рисунке 4.1. Для этой сети на рисунке 4.2 показана структура входящих потоков мультисервисного трафика.

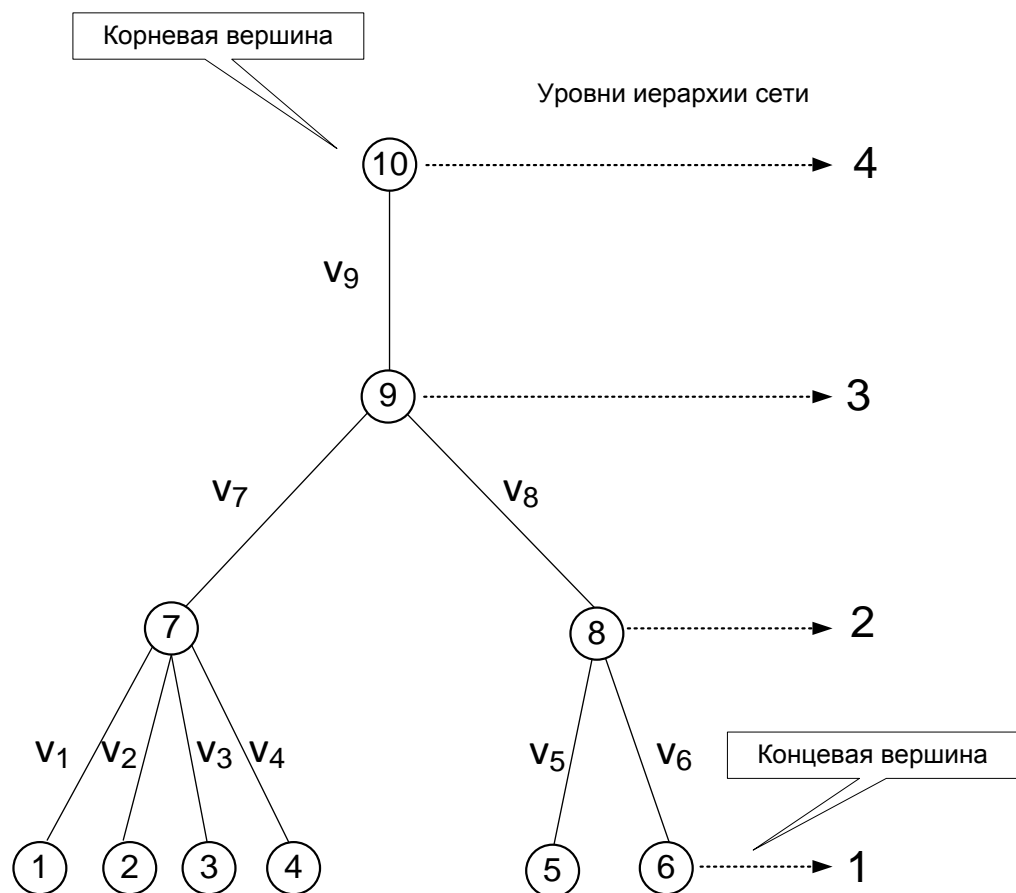


Рисунок 4.1 - Иерархическая сеть доступа, используемая для иллюстрации процедуры оценки необходимого ресурса передачи информации

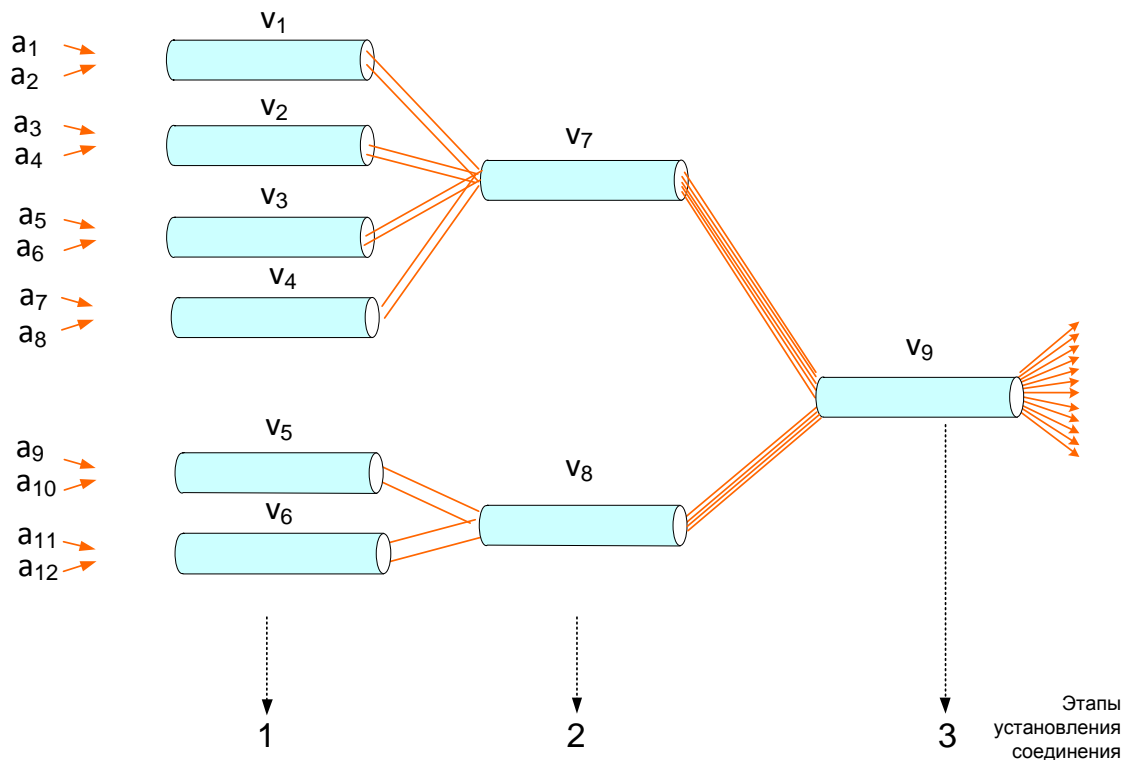


Рисунок 4.2 - Мультисервисная сеть доступа, имеющая топологию, представленную на рисунке 4.1

Значения фиксированных параметров модели определяются из соотношений:  $n=12$ ;  $v_1=20$  к.е.;  $v_2=30$  к.е.;  $v_3=40$  к.е.;  $v_4=50$  к.е.;  $v_5=20$  к.е.;  $v_6=30$  к.е.;  $v_7=140$  к.е.;  $v_8=50$  к.е.;  $v_9=190$  к.е.. Будем считать, что для всех потоков выполняется соотношение  $H_{k,1} = H_{k,2} = 0,9$ ,  $k=1,2,\dots,12$  и параметр экспоненциально распределенного времени обслуживания заявки одинаков для всех потоков и определяется из равенства  $\mu_k=1$ ,  $k=1,2,\dots,12$ . На каждую линию первого уровня доступа поступают два потока заявок. Один поток заявок на передачу трафика с малыми потребностями в ресурсе (для обслуживания соответствующей заявки требуется одна единица ресурса). Другой поток заявок на передачу трафика с большими потребностями (для обслуживания заявки требуется более одной единицы канального ресурса, в данном случае 5).

Определим фиксированные значения интенсивностей поступления первичных заявок из соотношений:  $a_1=10$ ;  $a_2=2$ ;  $a_3=15$ ;  $a_4=3$ ;  $a_5=20$ ;  $a_6=10$ ;  $a_7=4$ ;  $a_8=25$ ;  $a_9=5$ ;  $a_{10}=2$ ;  $a_{11}=15$ ;  $a_{12}=3$ . Для всех потоков среднее время

обслуживания заявки выбрано за единицу, поэтому интенсивности поступления заявок выражены в эрлангах, т.е. в значениях среднего числа потенциальных соединений анализируемого потока. Будем предполагать, что параметр экспоненциально распределенного времени до поступления повторной заявки одинаков для всех потоков и определяется из равенства  $\gamma_k = 10$ ,  $k = 1, 2, \dots, 12$ , а  $n_k = 30$ ,  $k = 1, 2, \dots, 12$ . Значение  $\pi = 0,05$ . Маршрутная матрица  $R$  исследуемой модели сети выглядит следующим образом:

$$R = \begin{array}{c|cccccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ \hline 1 & b_1 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_7 & b_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_9 & b_{10} & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} \\ 7 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} \\ 9 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} \end{array}$$

Результаты оценки доли потерянных заявок  $\pi_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , для каждого из 12 потоков в зависимости от шага введенного выше алгоритма показаны на рисунке 4.3. Ресурс линий увеличивался порциями по 5 к.е. в соответствии с результатами анализа значений  $\pi_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  и при фиксированном  $k$  значений  $B_{k,j}$ ,  $j \in R_k$ . Исходные значения скоростей, выраженные в канальных единицах, выбраны из (4.15):

$$\begin{aligned} v_1^{(0)} &= 20; v_2^{(0)} = 30; v_3^{(0)} = 40; v_4^{(0)} = 50; v_5^{(0)} = 20; \\ v_6^{(0)} &= 30; v_7^{(0)} = 140; v_8^{(0)} = 50; v_9^{(0)} = 190. \end{aligned}$$

Итоговые результаты в тех же единицах получены на 55 шаге:  $v_1 = 45$ ;  $v_2 = 55$ ;  $v_3 = 70$ ;  $v_4 = 80$ ;  $v_5 = 45$ ;  $v_6 = 55$ ;  $v_7 = 180$ ;  $v_8 = 80$ ;  $v_9 = 230$ .

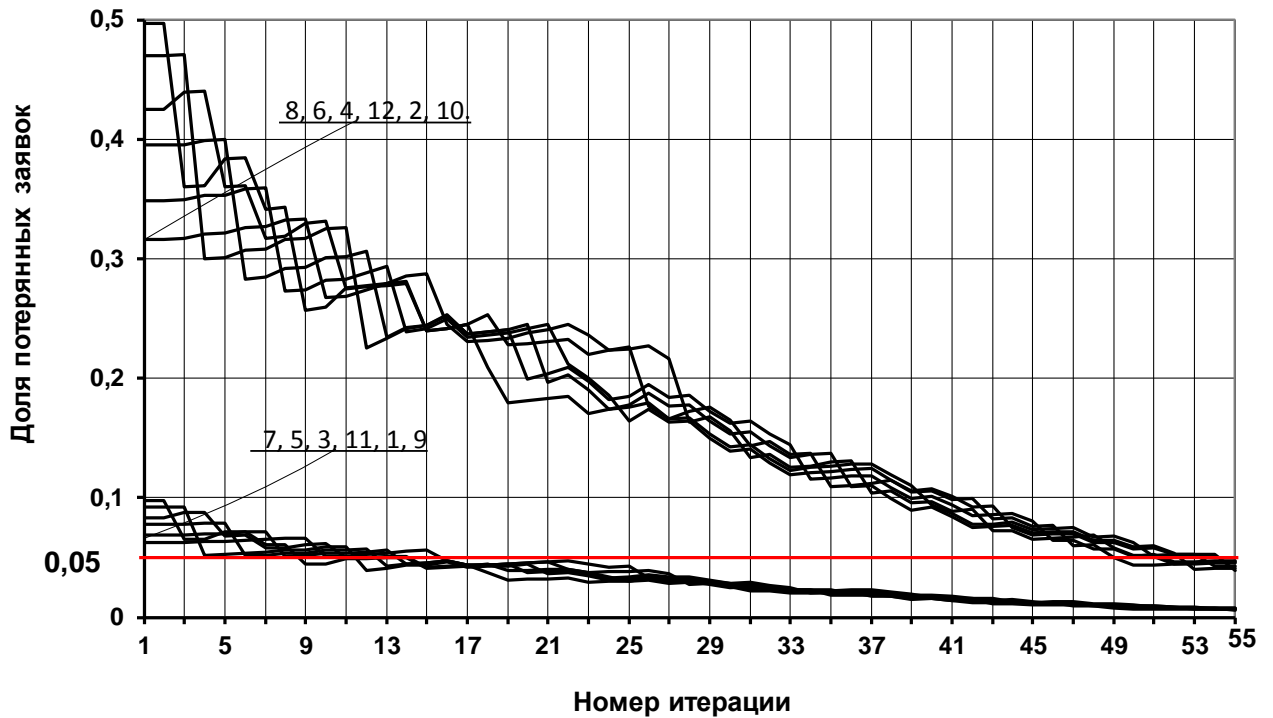


Рисунок 4.3 - Результаты промежуточного вычисления потерь заявок при решении задачи подбора скорости звеньев иерархической сети

Оценки потерь заявок, полученные с помощью метода просеивания заявок, имеют вид:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 0,0067; \pi_2 = 0,0407; \pi_3 = 0,0077; \pi_4 = 0,0473; \\ \pi_5 &= 0,0070; \pi_6 = 0,0425; \pi_7 = 0,0076; \pi_8 = 0,0461; \\ \pi_9 &= 0,0061; \pi_{10} = 0,0391; \pi_{11} = 0,0071; \pi_{12} = 0,0458. \end{aligned}$$

Оценим погрешность полученных результатов с помощью расчета этих же характеристик точными методами, основанными на имитационном моделировании (см. подраздел 2.5).

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 0,0050; \pi_2 = 0,0310; \pi_3 = 0,0059; \pi_4 = 0,0369; \\ \pi_5 &= 0,0053; \pi_6 = 0,0319; \pi_7 = 0,0058; \pi_8 = 0,0347; \\ \pi_9 &= 0,0048; \pi_{10} = 0,0314; \pi_{11} = 0,0056; \pi_{12} = 0,0360. \end{aligned}$$

Результаты точного расчета подтверждают приемлемость найденных значений скоростей звеньев иерархической сети. Реализация предложенной

процедуры оценки пропускной способности звеньев иерархической сети не вызывает затруднений для любых начальных значений входных параметров и топологий.

#### 4.5. Выводы

1. Для приближенной оценки характеристик качества обслуживания поступающих заявок в иерархических сетях доступа с учетом влияния повторных вызовов предлагается использовать их асимптотические выражения при стремлении интенсивности повторения заявки к бесконечности. Соответствующие выражения получены для всех введенных показателей качества обслуживания поступающих заявок. Показано, что для их расчета можно использовать характеристики иерархической сети без учета повторных вызовов, которые могут быть вычислены алгоритмом свертки для любых значений входных параметров.
2. Численное исследование погрешности, предложенной расчетной процедуры показало, что полученные асимптотические выражения обладают неплохой точностью (в большинстве случаев относительная погрешность оценке 20-30%) особенно, когда величина интенсивности повторения велика (более 30-40 повторений за среднее время обслуживания заявки). Рассматриваемое соотношение между входными параметрами характерно для систем связи, где функция повторного установления соединения автоматизирована.
3. В ситуации, когда интенсивность повторения заявок не так велика (менее 5-10 повторений за среднее время обслуживания заявки) предлагается использовать асимптотические выражения для характеристик при стремлении интенсивности повторения заявки к нулю. Расчетные выражения получены для всех введенных показателей качества обслуживания поступающих заявок. Показано, что для вычисления оценок



необходимо рассчитать характеристики иерархической сети без учета повторных вызовов для некоторой сходящейся последовательности значений предложенной нагрузки.

4. Численное исследование погрешности, предложенной расчетной процедуры показало, что полученные асимптотические выражения обладают неплохой точностью в рассматриваемой области изменения входных параметров (в большинстве случаев относительная погрешность оценки 10-25%). Предложенный алгоритм оценки характеристик отличается простотой и может быть реализован для любых значений входных параметров.
5. Построена рекурсивная процедура оценки скорости звеньев мультисервисной иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов. Сформулированы: методика оценки исходных параметров рассчитываемой модели; процедура оценки интенсивностей предложенного трафика; способ оценки начальных величин ресурса передачи звеньев сети; алгоритм перехода к следующему шагу рекурсии и критерий завершения рекурсивного цикла. Результаты численного исследования показали приемлемость построенного метода для оценки скорости звеньев мультисервисной иерархической сети.

## Заключение

Основные результаты диссертационного исследования состоят в следующем.

1. Анализ опыта функционирования сетей связи показал необходимость учета влияния поведения абонента на характеристики работы сети в условиях локальных перегрузок, вызванных выходом из строя оборудования, ошибками планирования, стихийными бедствиями и т.д. Особенно важно учитывать это явление в сетях доступа, которые в отличие от ядра сети не планируются с избытком пропускной способности.
2. Для оценки характеристик качества обслуживания абонентов разработана модель иерархической мультисервисной сети доступа, в которой абонент с вероятностью, зависящей от номера неудачной попытки соединения, повторяет вызов через случайный промежуток времени, имеющий экспоненциальное распределение. Интенсивность поступления первичных заявок, требование к ресурсу передачи информации, среднее время обслуживания, вероятность и интенсивность повторения вызова зависят от вида заказываемого сервиса. Модель можно использовать для оценки ресурса передачи соединительных линий иерархической сети доступа.
3. В рамках построенной модели сформулированы определения для вычисления основных характеристик качества обслуживания абонентов и установлены соотношения между ними. Их можно использовать для косвенной оценки характеристик в тех ситуациях, когда есть трудности в разделении первичных и повторных вызовов.
4. Исследованы возможности точной оценки значений характеристик. В общем случае рекомендуется использовать имитационное моделирование, в частных случаях, когда отсутствуют повторные заявки или рассматривается только одно звено сети значения характеристик могут быть рассчитаны,

соответственно, методом свертки или в результате решения системы уравнений равновесия численным методом.

5. Численный анализ модели показал существенную зависимость характеристик от настойчивости абонента к установлению соединения. Когда вероятность повторения вызова близка к единице доля потерянных заявок, а также другие характеристики модели могут в несколько раз превзойти значения аналогичных характеристик, рассчитанных без учета повторных вызовов. Отсюда следует, что традиционные методики планирования пропускной способности линий иерархических сетей доступа, необходимо дополнить результатами, позволяющими учитывать эту особенность формирования входных потоков заявок.
6. Для приближенной оценки характеристик обслуживания заявок в иерархических сетях доступа с учетом влияния повторных вызовов предлагается использовать их асимптотические выражения при стремлении интенсивности повторения заявки к бесконечности или к нулю. Расчетные формулы получены с использованием характеристик иерархической сети без учета повторных вызовов. Их значения могут быть вычислены алгоритмом свертки для произвольной топологии сети. Результаты численного анализа показали, что относительная погрешность приближенной оценки характеристик в большинстве случаев составляет 10-30%.
7. Построена рекурсивная процедура оценки требуемой по нагрузке и качеству обслуживанию абонентов скорости соединительных линий мультисервисной иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов. Сформулированы: процедура оценки начальных величин скорости передачи линий сети; алгоритм перехода к следующему шагу рекурсии и критерий завершения рекурсивного цикла. Численный анализ показал приемлемость использования расчетной процедуры для значений входных параметров, представляющих практический интерес.

## Список литературы

1. Анисимов, Д.В. Механизм распределенного доступа к среде передачи данных, обеспечивающий стабилизацию пропускной способности на максимальных значениях при высокой нагрузке в сетях стандарта IEEE 802.11 / Д.В.Анисимов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т.10. — №10. — С. 4 — 11.
2. Астрецов, Д.В. Исследование возможности использования блочного алгоритма снижения трафика в сети Fast Ethernet / Д.В.Астрецов, Е.С.Тарасов // Электросвязь. — 2017. — №1. — С. 70 — 73.
3. Бакланов, И.Г. NGN: принципы построения и организации / И.Г.Бакланов; под ред. Ю.Н.Чернышова. — М.: Эко-Трендз, 2008. — 400 с.
4. Бахарева, Н.Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей / Н.Ф.Бахарева, В.Н.Тарасов. — Самара: Издательство СНИЦ РАН, 2011. — 327 с.
5. Башарин, Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: учебное пособие. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во РУДН, 2009. — 342 с.
6. Башарин, Г.П. Массовое обслуживание в телефонии / Г.П.Башарин, А.Д.Харкевич, М.А.Шнепс. — М.: Наука, 1968. — 240 с.
7. Блукке, В.П. Исследование имитационной модели живучести интегральной информационной сети / В.П.Блукке, В.К.Попков // Электросвязь. — 2010. — №11. — С. 52 — 56.
8. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н.Вадзинский. — СПб.: Наука, 2001. — 296 с.
9. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С.Вентцель, Л.А.Овчаров. — М.: Высшая школа, 2000. — 383 с.
10. Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М.Вишневский. — М.: Техносфера, 2003. — 512 с.

11. Гавлиевский, С.Л. Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания: автореф. дис. ...д-р техн. наук 05.12.13 / Гавлиевский Серго Леонидович. — Самара, 2012. — 32 с.
12. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В.Гнеденко, И.Н.Коваленко. — Серия «Физ.-мат. б-ка инженера». 5-е изд., испр. и доп. — М.: КомКнига, 2005. — 400 с.
13. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В.Гнеденко, Ю.К.Беляев, А.Д.Соловьев. — М.: Либроком, 2013. — 584 с.
14. Гольдштейн, А. Б. Технология и протоколы MPLS / А.Б.Гольдштейн, Б.С.Гольдштейн. — СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005. — 304 с.
15. Гольдштейн, А.Б. Сети связи. Учебник для ВУЗов / А.Б.Гольдштейн, Н.А.Соколов, Г.Г.Яновский. — СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2010. — 400 с.
16. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. — М.: Стандартинформ, 2009. — 19 с.
17. Гулевич, Д.С. Сети связи следующего поколения / Д.С.Гулевич. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 184 с.
18. Джейсуол, Н. Очереди с приоритетами / Н.Джейсуол. — М.: Мир, 1973. — 278 с.
19. До Суан Тху. Модели и алгоритмы оценки пропускной способности линий концентрации мультисервисного трафика: Дис ... канд. техн. наук: 05.12.13 / До Суан Тху. — М., 2012. — 141 с.
20. Дудник, Б.Я. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я.Дудник, В.Ф.Овчаренко, В.К.Орлов, А.В.Шурмин. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
21. Дымарский, Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я.С.Дымарский, Н.П.Крутякова, Г.Г.Яновский. — М.: Мобильные коммуникации, 2003. — 384 с.
22. Ершов, В.А. Мультисервисные телекоммуникационные сети / В.А.Ершов, Н.А.Кузнецов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 432 с.

23. Ефимушкин, В.А. Процедура межуровневой адаптации для прогнозирования средней экспертной оценки пользователей / В.А.Ефимушкин, В.В.Плахов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т.11. — №1. — С. 57 — 61.
24. Захаров, Г.П. Службы и архитектура широкополосных цифровых сетей интегрального обслуживания / Г.П.Захаров, М.В.Симонов, Г.Г.Яновский. — М.: Эко-Трендз, 1993. —102 с.
25. Зелинский, А.М. Эквивалентные модели системы с повторными вызовами: Тр. уч. институтов связи / А.М.Зелинский, К.Н.Корнышев // Электросвязь — 1976. — № 8. — С. 37 — 42.
26. Ионин, Г.Л. Таблицы вероятностных характеристик полнодоступного пучка при повторных вызовах / Г.Л.Ионин, Я.Я.Седол. — М.: Наука, 1970. — 154 с.
27. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г.Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург. — 2005. — 400 с.
28. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Пер. с англ. под ред. Б.С.Цыбакова. — М.: Мир, 1979. — 600 с.
29. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. под ред. В.И.Неймана. — М.: Машиностроение, 1979. — 452 с.
30. Кожанов, Ю.Ф. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения / Ю.Ф.Кожанов. — СПб.: Альфарет, 2006. — 218 с.
31. Кокина, О. А. Построение модели и алгоритмов оценки характеристик пропускной способности звена мультисервисной сети связи с учётом повторных вызовов / О.А.Кокина, С.Н.Степанов // Автоматика и телемеханика. — 2006. — № 6. — С. 120 — 131.
32. Концептуальные положения по построению мультисервисных сетей на ВСС России: Министерство Российской Федерации по связи и информатизации. — 2001. — 35 с.
33. Корнышев, Ю.Н. Расчёт полнодоступной коммутационной системы с повторными вызовами / Ю.Н.Корнышев // Электросвязь. — 1969. — № 11. — С. 65 — 72.

34. Корнышев, Ю.Н. Теория телетрафика. Учебник для вузов / Ю.Н.Корнышев, А.П.Пшеничников, А.Д.Харкевич. — М.: Радио и связь, 1996. — 272 с.
35. Королев, В.Ю. Математические основы теории риска / В.Ю.Королев, В.Е.Бенинг, С.Я. Шоргин. — М.: Физматлит, 2011. — 620 с.
36. Кочкаров, А.А. Управление безопасностью и стойкостью сложных систем в условиях внешних воздействий / А.А.Кочкаров, Г.Г.Малинецкий // Проблемы управления. — 2005. — №5. — С. 70 — 76.
37. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г.Крамер. — М.: Мир, 1975. — 648 с.
38. Крылов, В.В. Теория телетрафика и её приложения / В.В.Крылов, С.С.Самохвалова. — СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005. — 288 с.
39. Кучерявый, А. Е. Сети связи общего пользования: тенденции развития и методы расчета / А.Е.Кучерявый, А.И.Парамонов, Е.А.Кучерявый. — М: ФГУП ЦНИИС, 2008. — 290 с.
40. Кучерявый, Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е.А.Кучерявый. — СПб.: Наука и техника, 2004. — 336 с.
41. Кучерявый, А.Е. Пакетная сеть связи общего пользования / А.Е.Кучерявый, Л.З.Гильченко, А.Ю. Иванов. — СПб.: Наука и техника, 2004. — 272 с.
42. Лагутин, В.С., Телетрафик мультисервисных сетей связи / В.С.Лагутин, С.Н.Степанов. — М.: Радио и связь, 2000. — 320 с.
43. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И.Ларичев. — М.: Логос, 2002. — 392 с.
44. Леваков, А.К. Задачи оценки показателей, определяющих качество функционирования телекоммуникационных сетей / А.К.Леваков, А.В.Федоров, Н.А.Соколов // Электросвязь. — 2015. — №6. — С. 24 — 27.
45. Леваков, А.К. Косвенные механизмы снижения лавинообразного трафика, возникающего в чрезвычайных ситуациях / А.К.Леваков // Вестник связи. — 2013. — №7. — С. 2 — 4.

46. Леваков, А.К. Оценка методов снижения телефонного трафика, порождаемого реакцией абонентов на событие / А.К.Леваков, М.В.Кабанов, Н.В.Пинчук, Н.А.Соколов // Вестник связи. — 2015. — №2. — С. 12 — 15.
47. Леваков, А.К. Приближенный анализ характеристик сети NGN при существенном росте трафика / А.К.Леваков // Электросвязь. — 2011. — №12. — С. 18 — 20.
48. Леваков, А.К. Результаты моделирования работы сети NGN при существенном росте трафика. Часть I / А.К.Леваков // Электросвязь. — 2012. — №7. — С. 32 — 34.
49. Леваков, А.К. Результаты моделирования работы сети NGN при существенном росте трафика. Часть II / А.К.Леваков // Электросвязь. — 2012. — №8. — С. 24 — 25.
50. Леваков, А.К. Особенности модернизации сетей доступа, созданных операторами телефонной связи / А.К.Леваков, Н.А.Соколов // Вестник связи. — 2013. — №6. — С. 41 — 44.
51. Линдгрэн, М. Сценарное планирование. Связь между будущим и стратегией / М.Линдгрэн, Х. Бандхольд. — М.: Олимп-Бизнес, 2009. — 256 с.
52. Лифиц, И.М. Теория и практика оценки конкурентоспособности товаров и услуг / И.М.Лифиц. — М.: Юрайт-М, 2005. — 224 с.
53. Масленников, А.Г. Экспериментальное исследование метода обработки трафика в очереди Linux-маршрутизатора на основе нечеткой логики / А.Г.Масленников // Т- Comm: Телекоммуникации и Транспорт. — 2016. — Т.10. — №1. — С. 19 — 23.
54. Мейкшан, В.И. Анализ качества обслуживания трафика в мультисервисной сети с адаптивной маршрутизацией при наличии повторных вызовов / В.И.Мейкшан, В.П.Корчагин // Электросвязь. — 2017. — №3. — С. 62 — 67.
55. Назаров, А.Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно – сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н.Назаров, К.И.Сычев. — Красноярск: Поликом, 2010. — 389 с.



56. Наумов, В.А. Теория телетрафика мультисервисных сетей / В.А.Наумов, К.Е.Самуйлов, Н.В.Яркина. — М.: Изд-во РУДН, 2007. — 191 с.
57. Нейман, В.И. Системы и сети передачи данных на железнодорожном транспорте: Учебник для студентов вузов / В.И.Нейман. — М.: Маршрут, 2005. — 460 с.
58. Нетес, В.А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN / В.А.Нетес // Вестник связи. — 2007. — №9. — С. 126 — 130.
59. Нетес, В.А. Расчет коэффициента оперативной готовности систем с сетевой структурой / В.А.Нетес, Б.П.Филин // Автоматика и телемеханика. — 1992. — №9. — С. 179 — 186.
60. Орлова Е.Ю. Оптоволоконные технологии и сферы их применения / Е.Ю.Орлова, А.А.Орлов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т.10. — №3. — С.63 — 66.
61. Осия, Д.Л. Особенности построения моделей мультисервисных сетей доступа / Д.Л.Осия // Труды международной конференции, посвященной дню Радио (выпуск LXVIII). — М.: РНТОРЭС и А.С. Попова. — 2013. — С. 84 — 86.
62. Осия, Д.Л. Исследование иерархических сетей доступа с учетом влияния поведения абонента, получившего отказ в обслуживании / Д.Л.Осия // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (МФИ–2013). — М.: МТУСИ. — 2013. — С.37 — 38.
63. Осия, Д.Л. Особенности использования иерархических сетей для описания функционирования сетей доступа / Д.Л.Осия // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (МФИ–2012). — М.: МТУСИ. — 2012. — С.27 — 28.
64. Осия, Д.Л. Модель иерархической сети доступа с повторными вызовами / Д.Л.Осия // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, часть II. — Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ. — 2015. — С. 223 — 225.

65. Осия, Д.Л. Оценка скорости звеньев иерархической сети доступа с учетом повторения заблокированной заявки / Д.Л.Осия // Естественные и технические науки. — 2017. — №1. — С. 119 — 124.
66. Осия, Д.Л. Оценка характеристик звена иерархической сети с повторением заблокированной заявки / Д.Л.Осия // Естественные и технические науки. — 2017. — №1. — С. 125 — 130.
67. Осия, Д.Л. Особенности планирования ресурса звеньев иерархической мультисервисной сети доступа / Д.Л.Осия // Сборник материалов XXXIV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий». — Новосибирск: Издательство ЦРНС. — 2017. — С. 80 — 86.
68. Осия, Д.Л. Структура и основные свойства модели мультисервисной иерархической сети доступа / Д.Л.Осия // Сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании». — СПб.: ООО «Стратегия Будущего». — 2017. — Т.1. — С. 105 — 109.
69. Осия, Д.Л. Соотношения между характеристиками иерархической сети доступа с учетом влияния повторных вызовов / Д.Л.Осия // Труды XI Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». — М.: ООО ИД Медиа Пабилшер. — 2017. — С. 233 — 235.
70. Осия, Д.Л. Оценка характеристик иерархической сети доступа в условиях большой загрузки / Д.Л.Осия // Труды международной конференции, посвященной дню Радио (выпуск LXXII). — М.: РНТОРЭС и А.С. Попова. — 2017. — С. 62 — 63.
71. Парамонов, А.И. Модели потоков трафика для сетей M2M / А.И.Парамонов // Электросвязь. — 2014 — № 4. — С. 9 — 14.
72. Попков, В.К. Математические основы моделирования сетей связи / В.К.Попков, Г.В.Попков, В.В.Величко. — М.: Горячая линия – Телеком, 2012. — 183 с.
73. Проблемы использования систем сотовой связи в чрезвычайных ситуациях

[Электронный ресурс] // - Режим доступа: [http://www.sagatelecom.ru/encyclopedia/protocol/detail.php?SECTION\\_ID=28&ID=22](http://www.sagatelecom.ru/encyclopedia/protocol/detail.php?SECTION_ID=28&ID=22). — (Дата обращения: 18.09.2017)

74. Птицын, Г.А. Методы оценки и математические модели живучести сетей связи / Г.А.Птицын // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т.10. — №4. — С. 47 — 51.
75. Росляков, А.В. Виртуальные частные сети. Основы построения и применения / А.В.Росляков. — М.: Эко-Трендз, 2006. — 304 с.
76. Росляков, А.В. Задачи планирования и оптимизации наложенных сервисных сетей / А.В.Росляков, А.А.Лысиков, Ю.Т.Халиуллина // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т.9. — №6. — С. 15 — 20
77. Самуйлов, К.Е. Математическая модель и метод оптимизации времени выполнения бизнес-процесса телекоммуникационной компании / К.Е.Самуйлов, А.В.Чукарин, Ю.В.Гайдамака, Э.Р.Зарипова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2017. — Т.11. — №1. — С. 37 — 44.
78. Соколов, Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи / Н.А.Соколов. — СПб.: Техника связи, 2012. — 432 с.
79. Соколов, Н.А. Тарифы на услуги связи и пирамида потребностей / Н.А.Соколов // Инфоком. Труды МАС. — 2004. — №2. — С. 18 — 20.
80. Степанов, С. Н. Способы уменьшения объёма вычислений при расчёте моделей систем связи с потерями, основанные на игнорировании маловероятных состояний / С.Н.Степанов, В.Б.Иверсен // Проблемы передачи информации. — 2001. — Т.37. — Вып. 3. — С. 82 — 95.
81. Степанов, С. Н. Качественные методы исследования систем с повторными вызовами / С.Н.Степанов, И.И.Цитович // Проблемы передачи информации. — 1987. — Т. 23. — Вып. 2. — С. 92 — 112.
82. Степанов, С.Н. Анализ модели с конечным числом источников нагрузки и учётом реакции абонента на отказ в обслуживании / С.Н.Степанов // Автоматика и телемеханика. — 1994. — № 4. — С. 100 — 113.

83. Степанов, С.Н. Асимптотический анализ моделей с повторными вызовами в случае большой нагрузки / С.Н.Степанов // Проблемы передачи информации. — 1993. — Т. 29. — Вып. 3. — С. 20 — 42.
84. Степанов, С.Н. Интегральные соотношения равновесия для недоступной системы с повторными попытками и их применение / С.Н.Степанов // Проблемы передачи информации. — 1980. — Т.16. — Вып. 4. — С. 88 — 93.
85. Степанов, С.Н. Оптимизация численного расчёта характеристик многопоточковых моделей с повторными вызовами / С.Н.Степанов // Проблемы передачи информации. — 1989. — Т.25. — Вып. 2. — С. 67 — 78.
86. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н.Степанов. — М.: Эко-Трендз, 2010. — 392 с.
87. Степанов, С.Н. Расчёт пучка линий с повторными вызовами и ожиданием / С.Н.Степанов // Электросвязь. — 1983. — № 6. — С. 9 — 13.
88. Степанов, С.Н. Способы повышения эффективности численных методов расчёта моделей с повторными вызовами / С.Н.Степанов // Проблемы передачи информации. — 1986. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 78 — 94.
89. Степанов, С.Н. Численные методы расчета систем с повторными вызовами / С.Н.Степанов. — М.: Наука, 1983. — 230 с.
90. Степанов, С.Н. Алгоритм оценки показателей обслуживания заявок в иерархических сетях доступа / С.Н.Степанов, Д.Л.Осия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2012. — № 7. — С. 193 — 195.
91. Степанов, С.Н. Асимптотические методы оценки характеристик иерархической сети доступа с учетом повторных вызовов / С.Н.Степанов, Д.Л.Осия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т.9. — № 3. — С. 44 — 49.
92. Степанов, С.Н. Модель иерархической сети доступа с учётом повторения заблокированных заявок / С.Н.Степанов, Д.Л.Осия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2013. — № 11. — С. 154 — 157.
93. Степанов, С.Н. Математическая модель иерархической мультисервисной сети доступа / С.Н.Степанов, Д.Л.Осия // Труды конференции «Телекоммуника-

- ционные и вычислительные системы» (МФИ–2012). — М.: МТУСИ. — 2012. — С. 25 — 26.
94. Степанов, С.Н. Построение и анализ модели передачи данных на линии доступа от конечной группы абонентов / С.Н.Степанов, А.М.Романов, Д.Л.Осия // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т. 9. — № 9. — С. 29 — 34.
95. Хинчин, А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания / А.Я.Хинчин. — М.: Либроком, 2010. — 240 с.
96. Шварц, М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ / Пер. с англ. В. И. Неймана: ч.1: — М.: Наука, 1992. — 336 с.; ч.2: — М.: Наука, 1992. — 272 с.
97. Шувалов, В.П. Методика обеспечения отказоустойчивости в мультисервисных сетях связи / В.П.Шувалов, И.Ю.Селянина // Проблемы информатики. — 2012. — №2. — С. 55 — 62.
98. Addie, R. G. Broadband Traffic Modeling: Simple Solutions to Hard Problems / R. G. Addie, M. Zukerman, T. D. Neame // IEEE Communications Magazine, August 1998. — P. 88—95.
99. Ahuja, R.K. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications / R.K.Ahuja, T.L.Magnanti, J.B.Orlin. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice – Hall, 1993. — 864 p.
100. Akimaru, H. Teletraffic Theory and Applications / H.Akimaru, K.Kawashima. — London, Berlin, New-York: Springer-Verlag, 1993. — 225 p.
101. Artalejo, J.R. Retrial queues: An algorithmic approach / J.R.Artalejo // Journal of the Egyptian Mathematical Society. — 2009. — V.17. — P. 83 —101.
102. Artalejo, J.R. Accessible bibliography on retrial queues: Progress in 2000-2009 / J.R.Artalejo // Mathematical and Computer Modelling. — 2010. — V.51. — P.1071 — 1081.
103. Artalejo, J.R. Retrial Queueing Systems: A Computational Approach / J.R.Artalejo, A.Gomez-Corral. — Springer, 2008. — 318 p.
104. Berezner, S.A. An Efficient Stable Recursion to Compute Multiservice Blocking Probabilities / S.A. Berezner, A.E. Krzesinski // Performance Evaluation. — 2001. — V.43. — P. 151 — 164.

105. Blake, J.T. Reliability Analysis of Interconnection Networks Using Hierarchical Composition / J.T.Blake, S.T.Traved // IEEE Transaction on Reliability. — 1989. — Vol. 38. — № 1. — P. 111—119.
106. Bocci, M. MPLS Generic Associated Channel / M.Bocci, M.Vigoureux, S.Bryant // RFC 5586. — 2009. — 18 p.
107. Bonald, T. Insensitive traffic models for communication networks / T.Bonald // Discrete Event Dynamic Systems. — 2007. — V.17. — №3. — P. 405 — 421.
108. Braden, R. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview / R.Braden, D.Clark, S.Shenker // RFC 1633. — 1994. — 28 p.
109. Braden, R. Resource ReSerVation Protocol (RSVP) / R.Braden, L.Zhang, S.Berson // RFC 2205. — 1997. — 112 p.
110. Broadband network traffic. Performance evaluation and design of broad-band multiservice networks. Final report of action COST 242 / James Roberts (ed). Lecture notes in computer sciences. — Springer, 1996. — 584 p.
111. Bryant S. Joint Working Team (JWT) Report on MPLS Architectural Considerations for a Transport Profile) / S.Bryant, L.Andersson // RFC 5317. — 2009. — 10 p.
112. Cabrera, B.D. On the Statistical Distribution of Processing Times in Network Intrusion Detection / B.D.Cabrera, J.Gosar, W.Lee // Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Bahamas. — 2004. — P. 75 — 80.
113. Cisco Networking Academy. Cisco Networking Academy Connecting Networks Companion Guide: Hierarchical Network Design [Электронный ресурс] / Cisco Networking Academy // Cisco Press. — 2015. — Режим доступа: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2202410&seqNum=4>. — (Дата обращения: 15.03.2017)
114. Cohen, J.W. Basic problems of telephone traffic theory and the influence of repeated calls / J.W.Cohen // Philips Telecom. Rev. — 1957. — V. 18. — N.2. — P. 49 —100.
115. Courcoubetis, C. Weber R. Pricing Communication Networks: Economics, Technology and Modelling / C.Courcoubetis. — Chichester, Wiley, 2003. — 357 p.
116. Delbrouck, L. E. N. On the Steady-State Distribution in a Service Facility Carrying Mixtures of Traffic with Different Peakedness Factor and Capacity Requirements /

- L.E.N.Delbrouck // IEEE Transactions on Communications. — 1983. — V.COM-31. — P. 1209—1211.
117. Evans, J. Deploying IP and MPLS QOS for Multiservice Networks. Theory and Practice / J.Evans, C.Filsfils. — Morgan Kaufmann Publishers, 2007. — 456 p.
118. Falin, G. I. Retrial Queues / G.I.Falin, J.G.C.Templeton. — Chapman & Hall, 1997 — 328 p.
119. Feneyrol, M. Telecommunication in the 21st Century. The Real and the Virtual / M.Feneyrol. — London: Springer, 1998. — 222 p.
120. Fortet, R. Congestion in a Loss System When Some Calls Want Several Devices Simultaneously / R.Fortet, Ch.Grandjean // Electrical Communications. — 1964. — V.39. — N.4. — P. 513 — 526.
121. Fortunato, T. Network Analysis: TCP Window Size [Электронный ресурс] / T.Fortunato // Network Computing. — 2016. — Режим доступа: <http://www.network-computing.com/careers/network-analysis-tcp-window-size/97729416>. — (Дата обращения: 19.09.2017)
122. Grimm, C. IP Traffic Theory and Performance. Springer Series on Signals and Communication Technology / C.Grimm, G.Schluchtermann. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. — 487 p.
123. Hui, J.Y. Resource allocation for broadband networks / J.Y.Hui // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 1988. — V. 6. — P. 1598 — 1608.
124. ITU-T. Definitions of terms related to quality of service. Recommendation E.800. — Geneva. — 2008. — 30 p.
125. ITU-T. Digital exchange performance design objectives. Recommendation Q.543 — Geneva. — 1993. — 40 p.
126. ITU-T. Gateway control protocol: Media gateway overload control package. Recommendation H.248.11. — Geneva. — 2013. — 26 p.
127. ITU-T. Intent to initiate approval of MPLS-TP commendations. Recommendation SG15 Q9, 10, 14 interregnum meeting. — Tokyo. — 2017. — 16 p.
128. ITU-T. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. Recommendation Y.1542. — Geneva. — 2006. — 26 p.

129. ITU-T. Framework(s) on network requirements and capabilities to support emergency telecommunications over evolving circuit-switched and packet-switched networks. Recommendation Y.1271. — Geneva. — 2004. — 20 p.
130. ITU-T. Network grade of service parameters and target values for circuit— switched services in the evolving ISDN. Recommendation E.721 — Geneva. — 1999. — 13 p.
131. ITU-T. Next Generation Networks - Emergency telecommunications — Technical considerations. Recommendation Y.2205. — Geneva. — 2011. — 52 p.
132. ITU-T. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). — Geneva. — 2003. — 321 p.
133. Iversen, V.B. The exact evaluation of multi-service loss system with access control / V.B.Iversen // Teleteknik. — 1987. — V.31. — N.2. — P. 56 — 61.
134. Iversen, V.B. The optimal dimensioning of multi-service links / V.B.Iversen, S.N.Stepanov // Modeling and simulation tools for emerging telecommunication networks Proc. COST-285 Mid-term Symposium. — 2005. — V.7 — P. 151—178.
135. Iversen, V.B. Derivatives of Blocking Probabilities for Multi-Service Loss Systems and their Applications / V.B.Iversen, S.N.Stepanov // Proc. 7th International Conference, Next Generation Teletraffic and Wired. Wireless Advanced Networking (NEW2AN 2007). — St. Petersburg. — 2007. — P. 260 — 268.
136. Iversen, V.B. The Calculation of Stationary Performance Measures of Loss Models with Access Control Based on the Concept of Truncation / V.B.Iversen, S.N.Stepanov // Proc. 14th Nordic Teletraffic Seminar. — Copenhagen. — 1998. — P. 277 — 286.
137. Iversen, V.B. The Unified Approach for Teletraffic Models to Convert Recursions for Global State Probabilities into Stable Form / V.B.Iversen, S.N.Stepanov // Proc. 19th International Teletraffic Congress. — Beijing. — 2005. — P. 1559 — 1570.
138. Iversen, V.B. Dimensioning of Multiservice Links Taking Account of Soft Blocking / V.B.Iversen, S.N.Stepanov, A.V.Kostrov // Proc. 6th International Conference, Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN 2006). — St. Petersburg. — 2006. — P. 3 — 10.
139. Iversen, V.B. Teletraffic Engineering and Network Planning / V.B.Iversen. — Technical University of Denmark, 2010. — 370 p.



140. Iversen, V.B. The Usage of Convolution Algorithm with Truncation for Estimation of Individual Blocking Probabilities in Circuit-Switched Telecommunication Networks. In: V.Ramaswami and P.E.Wirth (editors) / V.B.Iversen, S.N.Stepanov // Proc. 15th International Teletraffic Congress. — Amsterdam. — 1997. — P. 1327 — 1336.
141. Kaufman, J.S. Blocking in a shared resource environment / J.S.Kaufman // IEEE Transactions on Communications. — 1981. — V.29. — N.1. — P. 1474—1481.
142. Kelly, F.P. Blocking probabilities in large circuit-switched networks / F.P.Kelly // Adv. Appl. — 1986. — V.18. — P. 473 — 505.
143. Kelly, F.P. Reversibility and stochastic networks / F.P.Kelly. — New York: Willy, 1979. — 230 p.
144. Kuhn P. Analysis of Complex Queuing Networks by Decomposition. Proc. 8th International Teletraffic Congress / P.Kuhn. — Melbourne. — 1976. — P. 346
145. Levakov, A.K. Models of incoming traffic in packet networks / A.K.Levakov, A.N.Sokolov, N.A.Sokolov // T-Comm: Telecommunications and Transport. — 2015. — №5. — P. 91 — 94.
146. Lindberger, K. Dimensioning and design methods for integrated ATM networks / K.Lindberger // Proc. 14th International Teletraffic Congress. — 1994. — P. 897 — 906.
147. Massoulie, L. Roberts J.W. Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic / L.Massoulie // Telecommunication Systems. — 2000. — V.15— P. 185 — 201.
148. Metzler J. Reinventing the WAN [Электронный ресурс] / J. Metzler // Networword. — 2016. — Режим доступа: <http://www.networkworld.com/article/3055876/lan-wan/reinventing-the-wan.html>. — (Дата обращения: 15.10.2017)
149. Niven-Jenkins, B. Requirements of an MPLS Transport Profile / B.Niven-Jenkins, D.Brungard, M.Betts, N.Sprecher, S.Ueno // RFC 5654. — 2009. — 31 p.
150. Overview of Cisco Unified Border Element [Электронный ресурс] / Cisco // — Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/voice/cube/configuration/cube-book/voi-cube-overview.pdf>. — (Дата обращения: 15.09.2017)

151. Plevyak, T. Next Generation Telecommunications Networks, Services, and Management / T.Plevyak, V.Sahin. — Wiley, 2010. — 328 p.
152. Ross, K.W. Multiservice loss models for broadband telecommunication networks / K.W.Ross. — London: Springer, 1995. — 343 p.
153. Ronen, K. The Ultimate Guide to Everything You Need To Know About DDoS Attacks / K.Ronen, M.Deborah. — Radware, 2013. — 54 p.
154. Ross, K. Reduced load approximations for multi-rate loss networks service / K.Ross, S.Chung // IEEE Transactions on Communications. — 1993. — V.41. — N.8. — P. 1222 — 1231.
155. Stepanov, S.N. Generalized model with retrials in case of extreme load / S.N.Stepanov // Queueing Systems. — 1998. — V.27. — N.1 — 2. — P. 131 — 151.
156. Stepanov, S.N. Markov Models with Retrials: The Calculation of Stationary Performance Measures Based on the Concept of Truncation / S.N.Stepanov // Mathematical and Computer Modelling. — 1999. — V.30. — N.3 — 4. — P. 207 —228.
157. Sumits A. The History and Future of Internet Traffic [Электронный ресурс] / A.Sumits // Cisco Blogs. — 2015. — Режим доступа: <http://blogs.cisco.com/>. — (Дата обращения: 05.09.2017).
158. The Role of MPLS in Next-Generation IP/Ethernet Access and Aggregation Networks [Электронный ресурс] / Cisco // — Режим доступа: [https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/multiprotocol-label-switching-mpls/idc\\_insight\\_role\\_of\\_mpls\\_nav.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/ios-nx-os-software/multiprotocol-label-switching-mpls/idc_insight_role_of_mpls_nav.pdf). — (Дата обращения: 12.09.2017).
159. Titov I., Tsitovich I., Poryazov S. Use of time-scale for analysis of data source traffic / I.Titov, I.Tsitovich, S.Poryazov // Communications in Computer and Information Science. — Berlin: Springer-Verlag. — 2013. — V.356. — P. 187 — 197.
160. Tsitovich, I.I. Calculation of Stationary Probabilities for a Three-Stream Model of Control of the Access to the Resources of a Wireless Wideband network with Hystereses / I.I.Tsitovich, A.V.Chernushevich // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2011. — V.56. — N.12. — P. 1543 — 1551.

## Приложение

### Акты об использовании результатов диссертации

1. Акт об использовании результатов диссертационной работы Осия Д.Л. «Разработка модели и алгоритмов оценки пропускной способности иерархических сетей доступа в условиях перегрузки» в Республиканском унитарном предприятии «Абхазсвязь».
2. Акт об использовании результатов диссертационной работы Д.Л. Осия на тему: «Разработка модели и алгоритмов оценки пропускной способности иерархических сетей доступа в условиях перегрузки» в учебном процессе кафедры Сетей связи и систем коммутации МТУСИ.

АԢСНЫ АҖӘЫНҢАРРА



РЕСПУБЛИКА АБХАЗИЯ

АРЕСПУБЛИКАТӘ УНИТАРТӘ  
НАПЛАКЫ «АԢСНЕИМАДАРА»

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ УНИТАРНОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ «АБХАЗСВЯЗЬ»

Ақәа ақ, Семерцьиёв амәаду, 26

г. Сухум, ул. Семерджиёва, 26

Аҗәл, / тел.: (+7 840) 226 – 27 – 28, 226 – 27- 29

Исх. № 179«12» сентября 2017г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный Директор

РУП «Абхазсвязь»

Бигвава А.Т.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Осия Д.Л. «Разработка модели и алгоритмов оценки пропускной способности иерархических сетей доступа в условиях перегрузки» в Республиканском унитарном предприятии «Абхазсвязь».

Комиссия в составе: председателя Технического директора РУП «Абхазсвязь» Чамба Т.Р. и членов комиссии Начальника линейного цеха РУП «Абхазсвязь» Догуа Р.М. и Начальника ИТ-отдела РУП «Абхазсвязь» Кондакчян М.А. составила настоящий акт в том, что:

1. При анализе влияния поведения пользователя услуг связи на процесс формирования входного потока заявок в сети доступа РУП «Абхазсвязь» были использованы следующие результаты и методики, полученные в диссертационной работе Осия Д.Л. «Разработка модели и алгоритмов оценки пропускной способности иерархических сетей доступа в условиях перегрузки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:
  - математическая модель поступления и обслуживания заявок в сети доступа, учитывающая возможность повторения заявки из-за занятости соединительных линий сети.
  - методика оценки доли потерянных заявок, а также других показателей качества обслуживания поступающих заявок, основанная на использовании точных и приближенных алгоритмов расчета характеристик иерархических сетей доступа с учетом поведения абонента, получившего отказ в обслуживании.
2. Внедрение разработанных Осия Д.Л. методов и алгоритмов позволило:
  - оценить интенсивность поступления первичных вызовов, а также ряд других характеристик, прямое измерение которых затруднено из-за невозможности разделения первичных и повторных вызовов, и тем самым уточнить процедуры планирования пропускной способности линий сети доступа, требуемой по нагрузке и качеству обслуживания абонентов сети.

Председатель комиссии:

Технический директор РУП «Абхазсвязь»

Чамба Т.Р.

Члены:

Начальник линейного цеха РУП «Абхазсвязь»

Догуа Р.М.

Начальник ИТ-отдела РУП «Абхазсвязь»

Кондакчян М.А.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**

Ордена Трудового Красного Знамени  
федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И  
ИНФОРМАТИКИ»  
(МТУСИ)**



**FEDERAL COMMUNICATIONS  
AGENCY OF  
THE RUSSIAN FEDERATION**

**MOSCOW TECHNICAL  
UNIVERSITY  
OF COMMUNICATIONS  
AND INFORMATICS  
(MTUCI)**

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,  
www.mtuci.ru; mtuci.pf; e-mail: kanc@mtuci.ru  
Телефон (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36

ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;  
ОКВЭД 85.22, 46.19, 58.19, 61.10, 68.32, 72.19, 85.21, 85.23, 85.42.9; ОКТМО 45388000

\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г. № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_



Проректор по учебной работе МТУСИ,  
к.т.н., доцент

**Е.В. Титов**

« 30 » \_\_\_\_\_

2017 г.

**АКТ**

**об использовании результатов диссертационной работы Д.Л. Осия на  
тему: «Разработка модели и алгоритмов оценки пропускной способности иерархических  
сетей доступа в условиях перегрузки» в учебном процессе кафедры Сетей связи и систем  
коммутиации МТУСИ**

Комиссия в составе:

- директора Департамента организации и управления учебным процессом МТУСИ  
Карпушиной Н.Д.;

- заведующей Центром планирования и сопровождения учебного процесса МТУСИ  
Патенченковой Е.К.;

- заместитель заведующего кафедрой СС и СК Маликова Е. Е. удостоверяет, что в учебном процессе кафедры СС и СК при чтении курса лекций по дисциплине «Сети связи» используются результаты диссертационного исследования Осия Д.Л., а именно: проведенный диссертантом анализ используемых математических моделей иерархических сетей доступа, а также алгоритмы оценки требуемой скорости каналов связи, полученных в диссертационном исследовании.

Директор Департамента организации и управления  
учебным процессом МТУСИ

**Н.Д. Карпушина**

Зав. Центром планирования и сопровождения  
учебного процесса МТУСИ

**Е.К. Патенченкова**

Заместитель заведующего кафедрой СС и СК

**Е.Е. Маликова**