

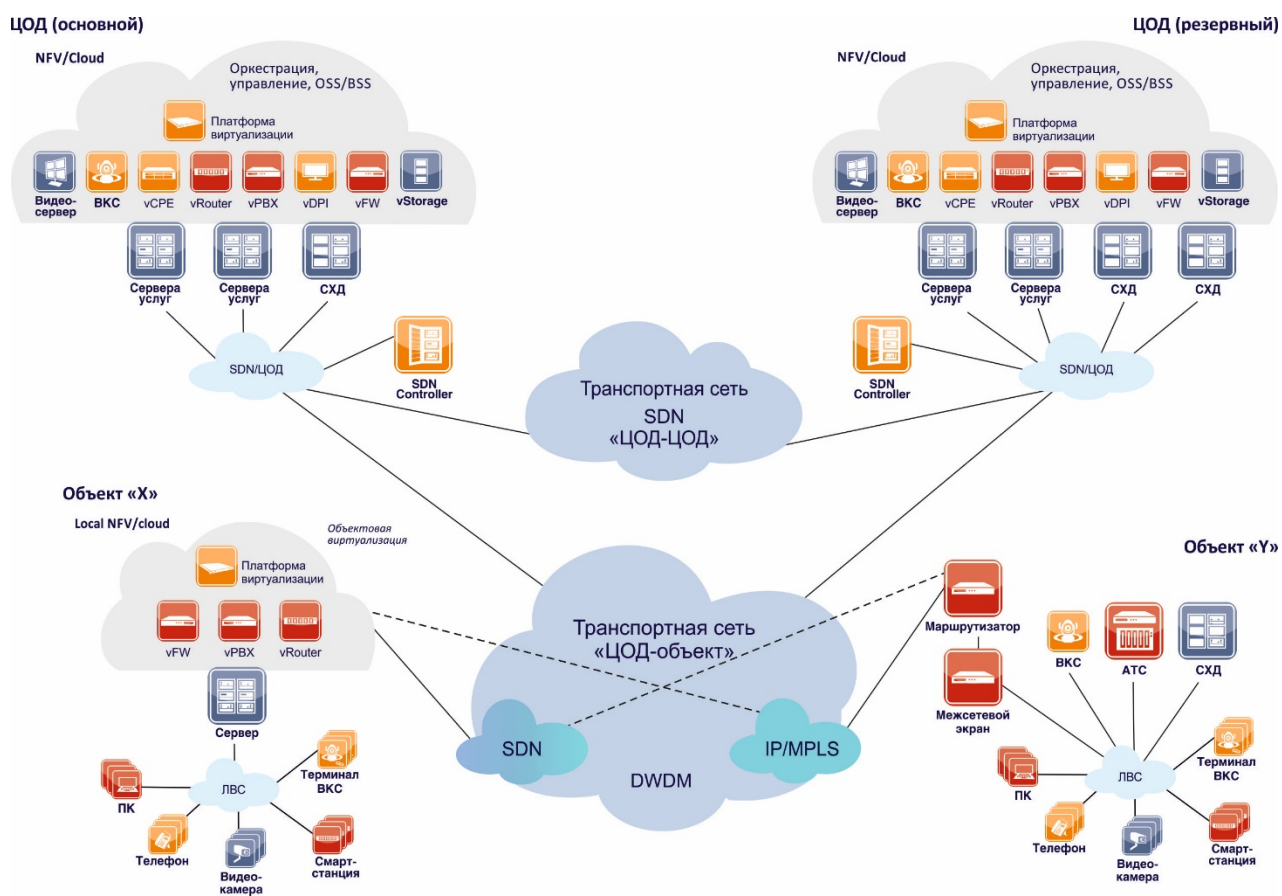


*Давыдов А. Е., Смирнов П. И., Пармонов А. И.*

## Проектирование телекоммуникационных систем и сетей

Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров и  
анализ трафика

*Учебное пособие*



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Давыдов А.Е., Смирнов П.И., Парамонов А.И.

# Проектирование телекоммуникационных систем и сетей

Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров и  
анализ трафика

Учебное пособие

Санкт-Петербург

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

2016

УДК 621.391 + 004.7

А.Е. Давыдов, П.И. Смирнов, А.И. Парамонов. Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров сетей связи и анализ трафика. СПб: Университет ИТМО, 2016. – 47 с.

В пособии рассматриваются теоретические основы и практические методы проектирования телекоммуникационных систем и сетей в части расчетов параметров сетей связи и анализа трафика, знание которых будет полезно исследователям и аналитикам, занимающимся задачами проектирования телекоммуникационных систем и сетей связи.

Пособие адресовано студентам, изучающим дисциплину «Проектирование телекоммуникационных систем и сетей». Направление подготовки 09.04.01.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Компьютерных технологий и управления, протокол № 8 от 11 октября 2016 г.

Рецензент: профессор, д.т.н. Кучерявых А.Е., зав кафедрой сетей связи и передачи данных СПб ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© А.Е. Давыдов, П.И. Смирнов, А.И. Парамонов, 2016

## Оглавление

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                 | 4  |
| 1 Сети с коммутацией каналов.....                                                                             | 5  |
| 1.1 Структура сетей с коммутацией каналов и сетевое оборудование .....                                        | 5  |
| 1.2 Понятие абонентской нагрузки .....                                                                        | 7  |
| 1.3 Показатели качества функционирования сети телефонной связи.....                                           | 9  |
| 1.4 Исследование качества функционирования, математические модели                                             | 11 |
| 1.5 Контрольные вопросы по изучаемой теме.....                                                                | 15 |
| 2 Сети с коммутацией пакетов.....                                                                             | 16 |
| 2.1 Структура сетей с коммутацией пакетов .....                                                               | 16 |
| 2.2 Трафик и услуги в сетях передачи данных, IP телефония .....                                               | 17 |
| 2.3 Показатели качества функционирования сетей передачи данных.....                                           | 20 |
| 2.4 Исследование трафика передачи данных. Математические модели...                                            | 21 |
| 2.5 Контрольные вопросы по изучаемой теме.....                                                                | 27 |
| 3 Оценка надежности сети связи .....                                                                          | 27 |
| 3.1 Показатели надежности .....                                                                               | 27 |
| 3.2 Проблемы и методы оценки надежности .....                                                                 | 28 |
| 3.3 Контрольные вопросы по изучаемой теме.....                                                                | 33 |
| 4 Анализ трафика передачи данных .....                                                                        | 33 |
| 4.1 Оценка параметров по результатам наблюдений. Применение<br>теории измерений и статистических методов..... | 33 |
| 4.2 Исследование функций распределения.....                                                                   | 35 |
| 4.3 Пример выборочного анализа трафика. Статистическая обработка<br>результатов измерений.....                | 36 |
| 4.3.1 Оценка параметров трафика.....                                                                          | 36 |
| 4.3.2 Построение и анализ гистограммы.....                                                                    | 38 |
| 4.4 Контрольные вопросы по изучаемой теме.....                                                                | 40 |
| Литература .....                                                                                              | 40 |

## **Введение**

Уровень развития телекоммуникационных систем и сетей обеспечивается развитием технологий передачи и обработки информации. Развитие и слияние этих технологий наиболее ярко выражается в процессе эволюции сетей и услуг связи. Неотъемлемой частью этого процесса является и процесс развития методов анализа и построения телекоммуникационных систем. Сети связи являются неотъемлемым элементом современной жизни. От их функционирования зависят практически все процессы и отношения в обществе, во всех сферах деятельности человека. Поэтому к состоянию сетей связи и их уровню развития предъявляются особые требования. Это выражается в создании международных организаций, работающих в области стандартизации, разработки отечественных стандартов и отраслевых документов в этой области.

Широкие возможности современных сетей связи создают материальную базу для развития и проникновения разнообразных услуг. В процессе появления и развития услуг возрастают требования к качеству функционирования сетей связи [1-4, 10], их надежности [22-24] и безопасности [15-17]. Процесс развития услуг приводит к перераспределению трафика в сетях связи общего пользования, что оказывает влияние на качество обслуживания и доходы операторов связи [44]. Степень важности решаемых задач, а также высокие темпы развития технологий и услуг требуют адекватного развития методов анализа, планирования и проектирования современных телекоммуникационных систем [11-13].

Построение сети связи - это комплексная задача, связанная с выбором логической и физической структуры сети, точек размещения оборудования, способа и схемы построения линейных сооружений, изучением потребностей в услугах связи, прогнозированием спроса на них и выбором требуемых параметров оборудования и линий связи. Решение каждой из этих подзадач отражается на характеристиках проектируемой сети связи. Назначение сети как технической системы состоит в выполнении работы по доставке трафика при предоставлении услуг связи. Качество предоставления услуг является основной характеристикой функционирования этой системы. Увеличение объема ресурсов (числа каналов, пропускной способности, производительности) обеспечивает рост качества, но увеличивает стоимость сети, поэтому решение указанных подзадач должно следовать компромиссу между объемом ресурсов и качеством предоставления услуг. Современные сети связи предоставляют множество услуг, реализуемых с помощью технологии коммутации пакетов. Каждая из услуг может иметь специфические требования к качеству обслуживания, производимого ее пользователями трафика.

Для этих целей следует определить показатели качества услуги и методы, позволяющие связать их с объемом ресурсов и параметрами трафика.

В этом пособии приводятся примеры подходов к расчету параметров сетей связи с коммутацией каналов и коммутацией пакетов. Приведенные в пособии материалы дают лишь необходимые сведения для пояснения приводимых понятий и методов. Для углубленного изучения теоретических основ и расширения области знаний о задачах, связанных с расчетом параметров сетей связи, следует обратиться к рекомендуемой дополнительной литературе. В списке литературы приведено достаточное количество ссылок на публикации, посвященные вопросам исследования, анализа и проектирования телекоммуникационных систем и сетей, математического моделирования элементов систем и сетей связи.

В первой главе пособия приведены основные понятия, показатели качества и математические модели, применяемые при анализе технических решений и расчете канальной емкости в сетях с коммутацией каналов.

Во второй главе пособия приведены аналогичные материалы, применяемые при расчете пропускной способности сети с коммутацией пакетов.

В третьей главе приведены основные понятия, показатели надежности и математические модели, применяемые при расчете надежности сетей связи.

В четвертой главе рассмотрены методы исследования трафика в сетях передачи данных.

Настоящее пособие построено как краткий вспомогательный материал, ориентированный на изучение методов расчета сетей связи при выполнении самостоятельных, лабораторных и курсовых работ и не является заменой учебной литературы по курсу.

## **1 Сети с коммутацией каналов**

### *1.1 Структура сетей с коммутацией каналов и сетевое оборудование*

Технология коммутации каналов (КК) традиционно применялась как базовая технология построения сетей телефонной связи.

Основная особенность технологии коммутации каналов заключается в том, что единицей измерения ресурса сети связи является канал связи. При предоставлении услуги связи канал (или несколько каналов) предоставляются на все время предоставления услуги. Это время определяется длительностью занятия, которая в свою очередь в сети

телефонной связи в наибольшей степени зависит от длительности разговора.

Ввиду того, что технология коммутации каналов постепенно вытесняется технологией с коммутацией пакетов, вопросы построения сети с КК целесообразно рассмотреть с точки зрения разработанных ранее и существующих по сей день решений. Традиционно оборудование и линейные сооружения, используемые для построения телефонных сетей связи, принято подразделять на первичные и вторичные сети.

Первичная сеть – это каналообразующая сеть, определяющая структуру сети связи.

Вторичная сеть – это сеть коммутации, включающая в себя узлы коммутации, подключенные к первичной сети.

Примером структуры сетей с коммутацией каналов является структура телефонной сети общего пользования (ТфОП), представленная на рисунке 1.1 [1]. Основным коммутационным элементом ТфОП являются автоматические телефонные станции (АТС).

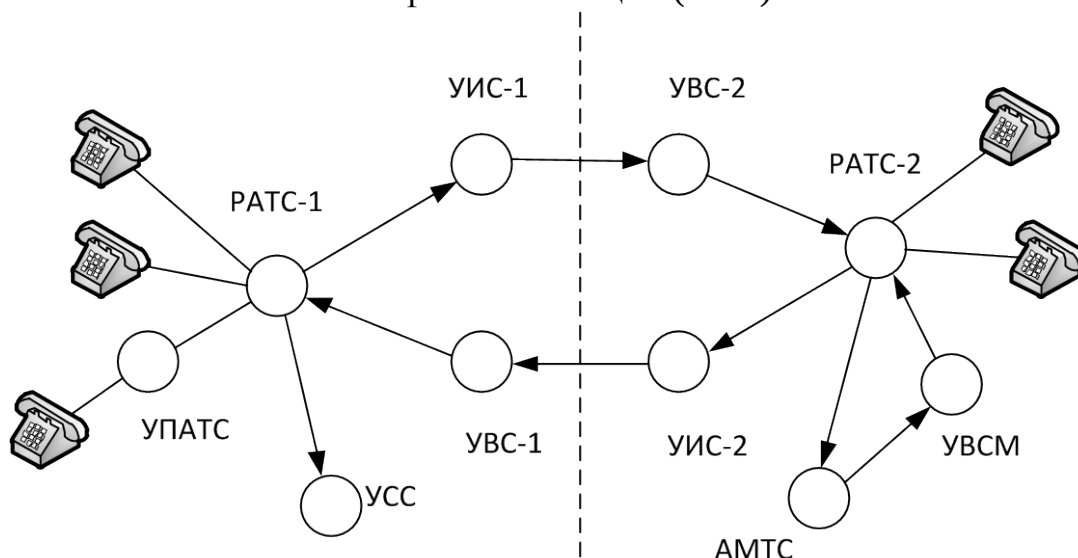


Рис. 1.1 - Пример структуры ГТС ТфОП с узлообразованием

Исторически городские сети телефонной связи строились с использованием архитектуры без узлообразования (при малом числе абонентов), в которой все АТС сети соединялись по принципу «каждая с каждой». Второй архитектурой является архитектура ТфОП с узлообразованием, в которую вводятся еще два вида узлов коммутации: узлы входящих сообщений и узлы исходящих сообщений (УВС и УИС). Пара таких узлов образует узловой район. Сети содержали узлы спецслужб (УСС), и междугородные автоматические телефонные станции (АМТС).

Все узлы связаны между собой соединительными линиями первичной сети, каждая из которых позволяет организовать некоторое количество независимых каналов (иногда эту группу каналов называют пучком соединительных линий).

С точки зрения локализации систем коммутации относительно населенных пунктов принято различать следующие уровни иерархии сетей: местный (городские и сельские сети), зональный (группа населенных пунктов на территории одной зоны нумерации), междугородный и международный (рисунок 1.2).

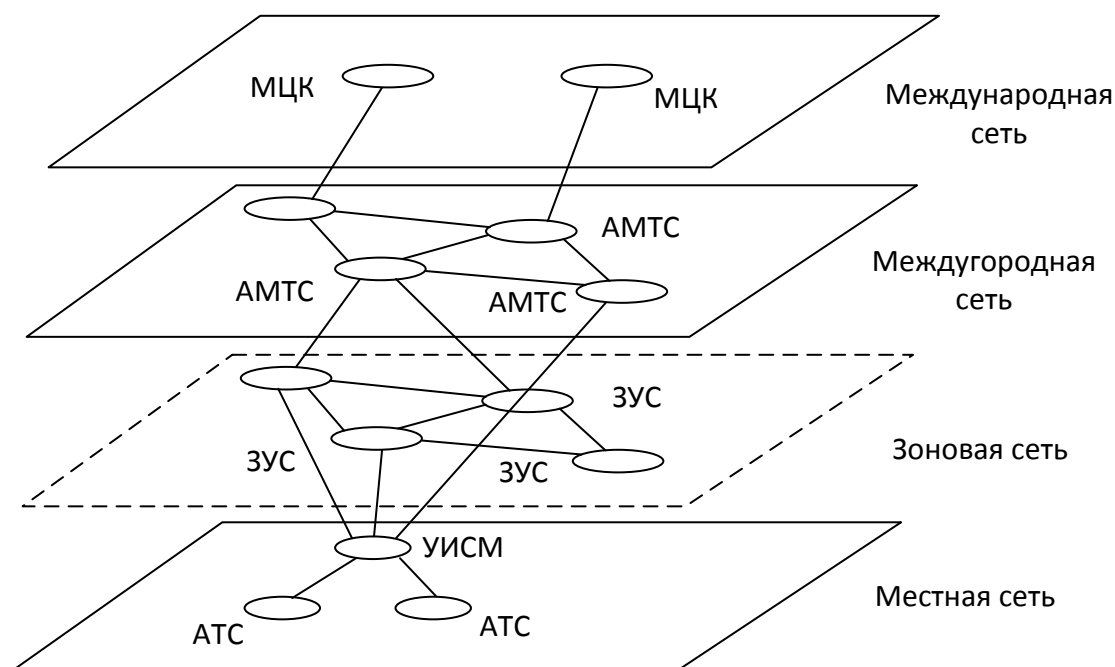


Рис. 1.2 - Иерархия местной, междугородной, зональной и международной сетей

В процессе модернизации сетей связи, связанной с распространением цифровых систем коммутации появились новые и изменились некоторые общепринятые названия узлов сети [1]. Районные АТС (РАТС) в цифровой сети обычно именуются опорная станция (ОПС), транзитная станция (ТС) - узлы УИС и УВС - и опорно-транзитная станция (ОПТС).

Основная задача проектирования сети связи – обеспечение требований к качеству предоставления услуг и надежности (устойчивости), которая решается выбором необходимого объема ресурсов: числа каналов, узлов коммутации и структуры их связей.

## 1.2 Понятие абонентской нагрузки

При обслуживании потока вызовов коммутационной системой каждый вызов занимает выход системы на некоторый промежуток времени. Если, например, выход одновременно обслуживает только один вызов, то загрузка выхода может характеризоваться суммарным временем обслуживания всех вызовов, а коэффициент полезного действия или использование выхода можно оценивать отношением суммарного времени обслуживания всех вызовов ко времени действия выхода. В теории



телетрафика суммарное время обслуживания вызовов принято называть нагрузкой.

Следует различать нагрузки: поступающую, обслуженную и потерянную [2].

*Обслуженная* коммутационной системой за промежуток времени  $(t_1, t_2)$  нагрузка  $Y_0(t_1, t_2)$  представляет собой сумму времен занятия всех выходов коммутационной системы, обслуживающей поступающий на ее входы поток вызовов за рассматриваемый промежуток времени [2].

Обслуженная за интервал времени нагрузка измеряется в часо-занятиях или минута-занятиях.

Интенсивность нагрузки – нагрузка за единицу времени (в телефонии, обычно за 1 ч). За единицу измерения интенсивности нагрузки принят эрланг (Эрл) по имени А. К. Эрланга. Один Эрл представляет собой нагрузку в одно часо-занятие за 1 ч.

В теории и практике расчета пропускной способности коммутационных систем обычно используется средняя интенсивность нагрузки, которую для краткости называют интенсивностью нагрузки.

*Под поступающей* на коммутационную систему за промежуток времени  $(t_1, t_2)$  нагрузкой  $Y(t_1, t_2)$  понимается такая нагрузка, которая была бы обслужена коммутационной системой за рассматриваемый промежуток времени, если бы каждому поступающему вызову тотчас было предоставлено соединение со свободным выходом.

*Потерянная* коммутационной системой в течение промежутка времени  $(t_1, t_2)$  нагрузка  $Y_n(t_1, t_2)$  представляет собой разность между поступающей и обслуженной нагрузками за рассматриваемый промежуток времени.

*Час наибольшей нагрузки.* Интенсивность нагрузки в сетях связи не постоянна во времени, поэтому для практических расчетов часто используют ее наибольшее ожидаемое значение. В качестве такого значения выбирают значение в час наибольшей нагрузки (ЧНН). Под часом наибольшей нагрузки понимают интервал времени, продолжительностью 60 минут, в течение которого нагрузка максимальна в среднем, за достаточно продолжительный интервал времени.

*Удельная абонентская нагрузка.* В практических задачах часто используют понятие удельной абонентской нагрузки. Это интенсивность нагрузки, создаваемой одним абонентом, в среднем в достаточно большой группе абонентов. Она также измеряется в эрлангах.

Связь интенсивности нагрузки, интенсивности вызовов и среднего времени занятия

$$y = c\bar{t} \text{ Эрл,} \quad (1.1)$$

где  $c$  – интенсивность вызовов (вызовов в час);

$\bar{t}$  – среднее время занятия (час).

Значение удельной абонентской нагрузки может быть специфично для различных абонентов. Иногда вводят условную классификацию абонентов, например, квартирные абоненты (квартирный сектор), бизнес абоненты (учрежденческий сектор), таксофоны и т.д. Также имеет место специфика и для абонентов сетей фиксированной и подвижной связи.

В качестве типового примера интенсивности удельной абонентской нагрузки для сетей фиксированной связи является значение 0,1 Эрл, а для сетей подвижной связи 0,03 Эрл. Более детальные рекомендации по выбору значений удельной нагрузки даны в [25], некоторые из них приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Примеры типовых значений удельной абонентской нагрузки

| № п/п | Характеристика абонента телефонной связи | Значение удельной абонентской нагрузки, Эрл |
|-------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1     | ГТС (квартирный сектор)                  | 0,060                                       |
| 2     | ГТС (учрежд. Сектор)                     | 0,140                                       |
| 3     | СТС (квартирный сектор)                  | 0,023 (зависит от емкости АТС)              |
| 4     | СТС (учрежд. Сектор)                     | 0,054 (зависит от емкости АТС)              |

Значения удельной абонентской нагрузки приводятся на час наибольшей нагрузки.

### 1.3 Показатели качества функционирования сети телефонной связи

Показателями качества услуги телефонной связи являются: качество передачи речи и вероятность отказа установления соединения (коэффициент потерь вызовов и время установления соединения).

*Качество передачи речи.* Для оценки качества передачи речи применяют методы экспертных оценок используя рейтинговые оценки (MOS – Mean Opinion Score, R – фактор). Усредненная экспертная оценка характеризует субъективное качество восприятия услуги (QoE – Quality of Experience). При использовании стандартных технических средств, отклонение от нормы качества передачи речи происходит только при их неисправности. При проектировании сети связи, как правило, этот показатель не оценивается.

*Коэффициент потерь вызовов.* Коэффициент потерь вызовов характеризует вероятность отказа установления соединения из-за нехватки ресурсов сети, т.е. нехватки каналов.

При измерениях коэффициент потерь оценивается средней величиной вероятности потерь

$$\bar{p} = \frac{n_f}{n_0}, \quad (1.2)$$

где  $n_0$  – общее число попыток вызовов;

$n_f$  - количество отказов.

Коэффициент потерь, обычно приводится в % или ‰ (промилле, 1‰=0,1%=0,001).

Для услуги телефонной связи установлены отраслевые нормативы (Приказ №113 Минкомсвязи РФ от 27.09.2007 г.) [3].

Таблица 1.2 – Нормативы на коэффициент потерь вызовов

| Наименование показателя                                                                                                                                                 | Норма<br>(в час<br>наибольшей<br>нагрузки), % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Доля несостоявшихся вызовов из-за технических неисправностей или перегрузки сети связи в общем количестве попыток вызовов (потери вызовов) при установлении соединений: |                                               |
| в сети местной телефонной связи, функционирующей в пределах территории поселения с численностью населения более 3000 человек                                            | не более 2                                    |
| в сети местной телефонной связи, функционирующей в пределах территории поселения с численностью населения менее 3000 человек                                            | не более 3                                    |
| в сети зонавой телефонной связи                                                                                                                                         | не более 2                                    |
| в сети междугородной и международной телефонной связи                                                                                                                   | не более 2                                    |
| в сети подвижной связи                                                                                                                                                  | не более 5                                    |
| с узлом обеспечения вызова экстренных оперативных служб                                                                                                                 | не более 0,1                                  |

Примечание - Вероятность превышения значений, указанных в строках, не должна превышать 0,05.

*Время установления соединения.* Время установления соединения условно подразделяется на несколько этапов:

-задержка получения ответа станции (время отклика узла связи, время с момента снятия телефонной трубки до получения сигнала «ответ станции»);

-время установления соединения (время с момента окончания набора номера вызываемого абонента до момента получения сигнала «посылка вызова»);

-время выполнения соединения (время с момента снятия вызываемым абонентом трубки до момента установления разговорного соединения);

-время разъединения (время с момента отправки сигнала разъединения до момента полного освобождения ресурсов).

Эти параметры также нормированы (Приказ №113 Минкомсвязи РФ от 27.09.2007 г.) [3].

Таблица 1.3 – Нормативы на временные параметры

| Наименование показателя                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Норма<br>(в час<br>наибольшей<br>нагрузки), с |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Время с момента получения пользовательским (оконечным) оборудованием вызывающего абонента или пользователя услугой связи от узла связи сети местной телефонной связи информации об ответе от пользовательского (оконечного) оборудования вызываемого абонента или пользователя услугой связи до момента установления соединения между пользовательским (оконечным) оборудованием вызывающего и вызываемого абонента или пользователя услугой связи (время выполнения соединения): |                                               |
| в сети местной телефонной связи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | не более 1,5                                  |
| в сети зонавой телефонной связи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | не более 1                                    |
| в сети междугородной и международной телефонной связи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | не более 1                                    |
| Время с момента, когда пользовательское (оконечное) оборудование абонента или пользователя услугой связи начало передавать узлу связи сети местной телефонной связи информацию, необходимую для разъединения, до момента, когда это оборудование переходит в состояние готовности к установлению нового соединения (время разъединения)                                                                                                                                           | не более 1                                    |

Примечание - Вероятность превышения значений, указанных в строках, не должна превышать 0,05.

#### 1.4 Исследование качества функционирования, математические модели

Основной задачей при проектировании сети связи является обеспечение баланса между абонентским трафиком (спросом на услуги), объемом ресурсов сети (количества каналов) и качеством предоставления услуги (коэффициентом потерь вызовов).

При решении данной задачи рассматривают два уровня (модели ВОС): сетевой и канальный.

*Сетевой уровень.* На сетевом уровне рассматриваются маршруты пропуска трафика в сети. Для этого сеть связи удобно описать моделью графа [5] (в данном случае ориентированного), в которой узлы сети (АТС и узлы связи) соответствуют вершинам графа, а линии связи дугам графа (рисунок 1.3). В данном примере приведена структура сети двух узловых районов ГТС, в которой вершины 1, 2, 3 и 8, 9, 10 соответствуют АТС, вершины 4 и 6 УИС, 5 и 7 УВС.

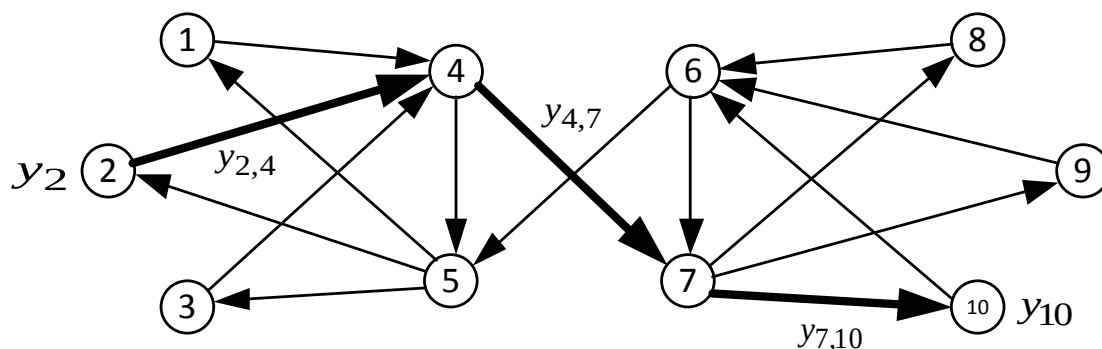


Рис. 1.3 - Описание сети моделью графа

Каждая из дуг графа характеризуется интенсивностью нагрузки  $y_{i,j}$ . Значения интенсивностей нагрузки определяются распределением трафика в сети связи между окончными узлами (АТС).

Интенсивность нагрузки, производимая абонентами АТС  $i$  зависит от удельной интенсивности нагрузки и количества абонентов. Например, если для абонентов введена классификация по  $k$  секторам

$$y_i = n_i^{(кв)} y_0^{(кв)} + n_i^{(уч)} y_0^{(уч)} + \dots + n_i^{(k)} y_0^{(k)} \quad (1.3)$$

$$n_i^{(кв)} + n_i^{(уч)} + \dots + n_i^{(k)} = n_i,$$

где  $n_i^{(k)}$  - количество абонентов  $k$ -го сектора, включенных в данный узел;

$n_i$  - общее количество абонентов, включенных в данный узел.

Доля трафика, производимого абонентами узла  $i$ , направляемая на узел  $j$ , определяется коэффициентами распределения  $k_{ij}$ ,  $j=1..d$ , где  $d$  – количество направлений связи. В данном случае рассматриваются только окончные узлы или узлы, связывающие данную сеть с другой сетью (например, АМТС, УСС).

Таким образом, данная модель сети позволяет создать описание сети в виде таблицы нагрузок между окончными узлами связи, в которой

$$Y_{i,j} = y_i^{(исх)} k_{ij}, \quad (1.4)$$

где  $y_i^{(исх)}$  интенсивность исходящей нагрузки. Обычно в расчетах принимают

$$y_i^{(исх)} = \frac{1}{2} y_i. \quad (1.5)$$

Таблица 1.4 – Распределение трафика между окончными узлами

|    | 1          | 2          | 3          | 8          | 9          | 10          |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1  | $Y_{1,1}$  | $Y_{1,2}$  | $Y_{1,3}$  | $Y_{1,8}$  | $Y_{1,9}$  | $Y_{1,10}$  |
| 2  | $Y_{2,1}$  | $Y_{2,2}$  | $Y_{2,3}$  | $Y_{2,8}$  | $Y_{2,9}$  | $Y_{2,10}$  |
| 3  | $Y_{3,1}$  | $Y_{3,2}$  | $Y_{3,3}$  | $Y_{3,8}$  | $Y_{3,9}$  | $Y_{3,10}$  |
| 8  | $Y_{8,1}$  | $Y_{8,2}$  | $Y_{8,3}$  | $Y_{8,8}$  | $Y_{8,9}$  | $Y_{8,10}$  |
| 9  | $Y_{9,1}$  | $Y_{9,2}$  | $Y_{9,3}$  | $Y_{9,8}$  | $Y_{9,9}$  | $Y_{9,10}$  |
| 10 | $Y_{10,1}$ | $Y_{10,2}$ | $Y_{10,3}$ | $Y_{10,8}$ | $Y_{10,9}$ | $Y_{10,10}$ |

Аналогично, на основе структуры сети и маршрутов пропуска трафика может быть построена и таблица нагрузок на линии связи.

Таблица 1.5 – Распределение трафика по линиям связи

|    | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6          | 7         | 8         | 9         | 10          |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1  | $y_{1,1}$ |           |           | $y_{1,4}$ |           |            |           |           |           |             |
| 2  |           | $y_{2,2}$ |           | $y_{2,4}$ |           |            |           |           |           |             |
| 3  |           |           | $y_{3,3}$ | $y_{3,4}$ |           |            |           |           |           |             |
| 4  |           |           |           |           | $y_{4,5}$ |            | $y_{4,7}$ |           |           |             |
| 5  | $y_{5,1}$ | $y_{5,2}$ | $y_{5,3}$ |           |           |            |           |           |           |             |
| 6  |           |           |           |           | $y_{6,5}$ | $y_{6,7}$  |           |           |           |             |
| 7  |           |           |           |           |           |            |           | $y_{7,8}$ | $y_{7,9}$ | $y_{7,10}$  |
| 8  |           |           |           |           |           | $y_{8,6}$  |           | $y_{8,8}$ |           |             |
| 9  |           |           |           |           |           | $y_{9,6}$  |           |           | $y_{9,9}$ |             |
| 10 |           |           |           |           |           | $y_{10,6}$ |           |           |           | $y_{10,10}$ |

В данной таблице заполнены только те ячейки, которые соответствуют имеющимся в структуре сети линиям связи между узлами сети.

Для приведенной на рисунке 1.3 сети, например,

$$y_{2,4} = y_2^{(исх)}$$

$$y_{4,7} = y_1^{(исх)}(k_{1,8} + k_{1,9} + k_{1,10}) + y_2^{(исх)}(k_{1,8} + k_{1,9} + k_{1,10}) + y_3^{(исх)}(k_{1,8} + k_{1,9} + k_{1,10})$$

$$y_{7,10} = y_1^{(исх)}k_{1,10} + y_2^{(исх)}k_{2,10} + y_3^{(исх)}k_{3,10} + y_8^{(исх)}k_{8,10} + y_9^{(исх)}k_{9,10}.$$

Данные из таблицы 1.5 являются основой для следующего этапа расчета сети.

*Канальный уровень.* На данном уровне требуется оценить необходимое количество каналов, образуемых линиями связи между узлами сети. Для этого необходимо знать интенсивность трафика, обслуживаемого линиями связи, которая получена на предыдущем этапе, и норматив на коэффициент потерь вызовов, который задается существующими отраслевыми документами или техническим заданием.

Задача решается методами теории телетрафика (теории массового обслуживания). Поток вызовов от абонентов рассматривается как случайный поток заявок на обслуживание, каналы рассматриваются как обслуживающие устройства, которые занимаются входящими вызовами на некоторое случайное время, равное времени занятия (приблизительно времени разговора). Модель такой системы должна описывать взаимодействие двух случайных процессов: процесса поступления заявок (и занятия каналов) и процесса освобождения каналов и называется системой массового обслуживания (СМО). При поступлении заявки в момент, когда все каналы заняты, заявка получает отказ (теряется). Такая дисциплина обслуживания называется дисциплина обслуживания с потерями (отказами). Цель построения математической модели в том, чтобы связать интенсивность абонентского трафика, количество каналов и вероятность потерь (отказов).

Подробно модели СМО описаны, например, в [2]. Здесь рассмотрим лишь основные свойства некоторых из них.

Модели СМО связывают показатели качества с параметрами потока заявок и характеристиками процесса их обслуживания. Они разработаны для потоков и процессов, имеющих определенные свойства. Поэтому, выбор той или иной модели зависит от свойств тех процессов, которые она должна описывать.

*1. Модель потока заявок.* Модель потока вызовов от абонентов (потока заявок) в телефонии, обычно, описывают моделью простейшего потока.

Простейший поток заявок представляет собой временную последовательность независимых случайных событий. Под событием понимается поступление вызова. Этот поток имеет три свойства:

- стационарный;
- ординарный;
- без последдействия.

Стационарность потока – вероятность поступления  $k$  заявок за интервал времени  $\tau$  зависит только от величины этого интервала и не зависит от того, где на оси времени он выбран.

Ординарность потока - вероятность поступления двух и более заявок за интервал времени, стремящийся к нулю, тоже стремится к нулю.

Отсутствие последдействия – независимость настоящего от прошлого, т.е. процесс поступления заявок не зависит ни от процесса поступления до настоящего момента ни от состояния системы обслуживания.

Для простейшего потока вероятность поступления  $k$  заявок за интервал времени  $t$  является случайной величиной, имеющей распределение Пуассона

$$p_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (1.6)$$

где  $\lambda$  - интенсивность потока (заявок/ед. времени).

Интервалы времени между заявками в таком потоке также случайны и имеют экспоненциальное распределение вероятности

$$f(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (1.7)$$

2. *Модель процесса обслуживания.* В этой модели предполагается, что обслуживающее устройство (канал) занимается заявкой на случайное время, которое имеет экспоненциальное распределение вероятности. Такое предположение достаточно точно описывает реальные телефонные вызовы

$$f(x) = 1 - e^{-\mu x}, \quad (1.8)$$

где  $\mu$  - интенсивность обслуживания (заявок/ед. времени).

$\bar{t} = \frac{1}{\mu}$  - среднее время обслуживания (занятия канала).

3. *Вероятность отказов (потерь вызовов).* В условиях описанных моделей вероятность отказов определяется как первая формула Эрланга (В – формула Эрланга)

$$p = \frac{\frac{y^v}{v!}}{\sum_{j=0}^v \frac{y^j}{j!}}, \quad (1.9)$$

где  $y$  – это интенсивность нагрузки (Эрл);

$v$  – количество каналов.

Используя выражение (1.9) для полученной выше таблицы 1.5 можно вычислить для каждой из линий связи необходимое количество каналов, при заданной вероятности потерь.

Таким образом, алгоритм расчета числа каналов для сети с коммутацией каналов можно определить следующим образом:

1. Вычислить интенсивность абонентской нагрузки, производимой в конечных узлах связи.

2. Вычислить таблицу распределения нагрузки между конечными узлами связи.

3. Вычислить таблицу распределения нагрузки по имеющимся линиям связи.

4. Для полученных значений нагрузки и заданной величины потерь вычислить требуемое число каналов для каждой из линий связи.

## 1.5 Контрольные вопросы по изучаемой теме

1. Структура сетей с коммутацией каналов, узлообразование.

2. Иерархия местной, междугородной, зонавой и международной сетей.

3. Понятие абонентской нагрузки, обслуженная, поступающая, потерянная нагрузка.



4. Интенсивность абонентской нагрузки, удельная абонентская нагрузка, час наибольшей нагрузки, типовые значения удельной абонентской нагрузки, принятые в телефонии единицы измерения.

5. Показатели качества функционирования сети телефонной связи, связь с качеством восприятия услуги.

6. Математические модели сетевого уровня.

7. Математические модели канального уровня.

8. Модель потока вызовов (заявок), свойства потока.

9. Модель процесса обслуживания вызовов (заявок).

10. Модель оценки вероятности отказов. Первая формула Эрланга.

## 2 Сети с коммутацией пакетов

### 2.1 Структура сетей с коммутацией пакетов

Современные сети связи, как правило, строятся с применением технологии с коммутацией пакетов.

Основная особенность технологии коммутации пакетов заключается в том, что единицей измерения ресурса сети связи является время передачи пакета. Вся передаваемая в сети информация представлена пакетами данных. Предоставление услуги связи осуществляется передачей пакетов данных через сеть связи.

Основными элементами сети связи являются узлы связи, осуществляющие маршрутизацию (коммутацию) пакетов, передавая их в соответствии с адресной информацией и правилами маршрутизации.

В структуре сети с пакетной коммутацией можно условно выделить три уровня: уровень доступа, уровень распределения (агрегирования) трафика и уровень ядра сети, рисунок 2.1.

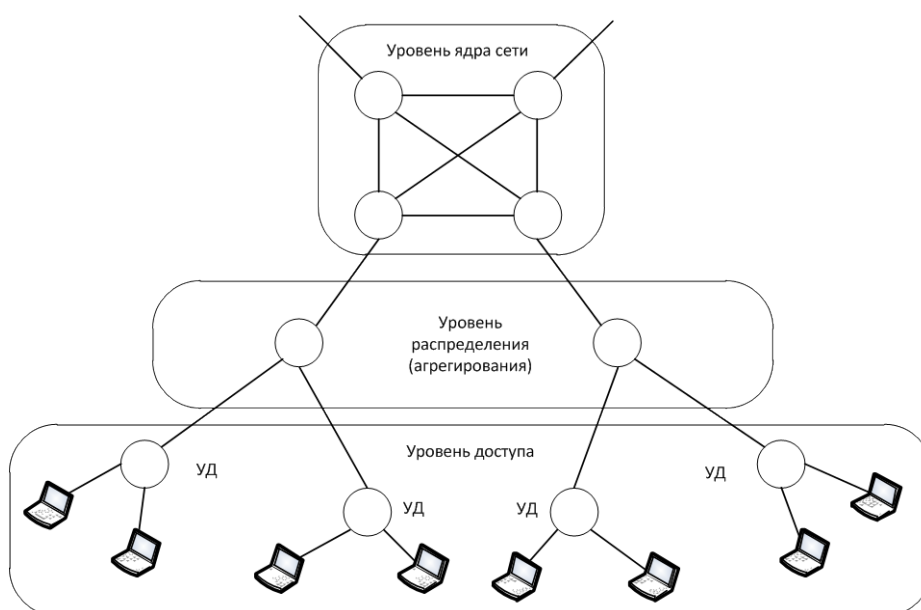


Рис. 2.1 - Структура сетей с коммутацией пакетов

Сети принято классифицировать согласно масштабу на: WAN – глобальные, MAN – уровня города, LAN – уровня организации, PAN – персональные, BAN – нательные.

## 2.2 Трафик и услуги в сетях передачи данных, IP телефония

Трафик в сети передачи данных представляет собой поток пакетов, его обычно описывают моделью случайного потока заявок. Под заявкой понимают поступление пакета данных.

Трафик характеризуется такими параметрами как:

- интенсивность поступления пакетов  $\lambda$  (пакетов/с);
- и средняя длина пакета  $\bar{L}$  (бит, байт);
- интенсивность трафика  $a = \lambda \bar{L}$  (бит/с).

Пример реализации трафика приведен на рисунке 2.2.

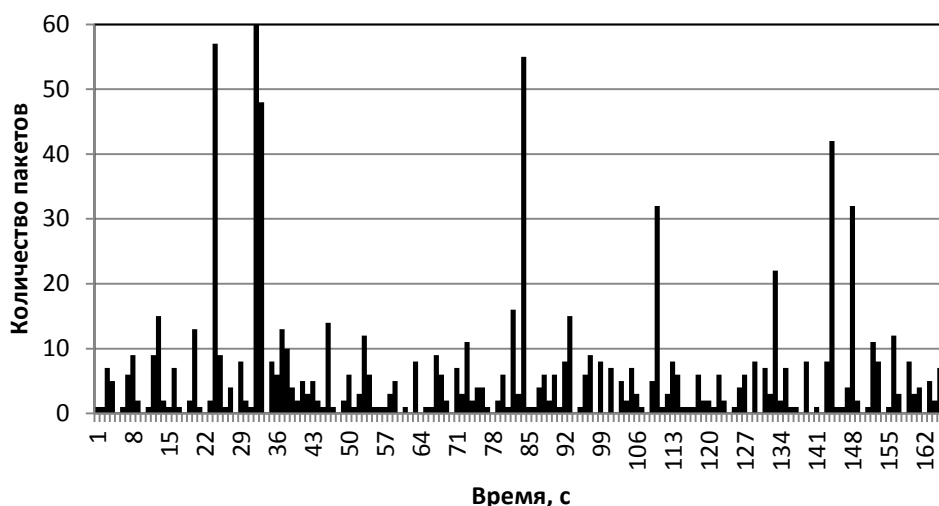


Рис. 2.2 - Пример реализации трафика. Число пакетов, подсчитанное за интервалы времени 1 с

По аналогии с сетями с коммутацией каналов, трафик в сети с коммутацией пакетов также создает нагрузку на сеть связи. Эта нагрузка определяется той работой, которую сеть выполняет при передаче пакетов данных. Обслуживание пакетов в узлах связи заключается в их коммутации, т.е. направлении на определенный выход (порт) согласно правилам маршрутизации, а также в передаче пакета по линии связи. Время, необходимое для передачи пакета (а также время коммутации) определяют пропускную способность сети связи и зависят от параметров используемого оборудования. Обычно, пакет данных передается модемом или иным устройством узла связи последовательным способом. Время передачи пакета определяется его размером (количеством передаваемых бит) и скоростью передачи, которая определяется параметрами модема и линии связи. Пакеты, поступающие в то время, когда передается очередной пакет, помещаются в буферную память узла связи (очередь) где

ожидают своей очереди на передачу. Если количество ожидающих в очереди пакетов достигает некоторой заданной величины, то вновь поступающие пакеты теряются (стираются). В этом случае имеет место комбинированная дисциплина обслуживания – с ожиданием и потерями (отказами).

Для предоставления услуги связи в сети с коммутацией пакетов требуется доставка пакетов, по крайней мере, между двумя узлами связи. При этом доставка может производиться по маршруту, содержащему несколько участков (узлов и линий связи). Как было отмечено выше, доставка пакета на каждом из этих участков требует затрат времени которые, в общем случае, определяются временем распространения сигнала, временем передачи пакета по линии связи и временем ожидания пакета в очереди в узле связи

$$T_D = T_{pr} + T_{tr} + T_W, \quad (2.1)$$

где  $T_{pr}$  – время распространения сигнала;

$T_{tr}$  – время передачи пакета;

$T_W$  – время ожидания в узле связи.

Время распространения сигнала в большинстве систем связи определяется временем распространения электрического (электромагнитного поля) или оптического сигнала. С достаточной для практических приложений точностью скорость распространения сигнала описывают величиной близкой к скорости распространения света. В практических расчетах проводных сетей принимают время распространения равное 5 мкс/км.

$$T_{pr} = 5d \text{ мкс}, \quad (2.2)$$

где  $d$  – расстояние в км.

В сетях относительно малой протяженности (PAN, LAN, MAN) этой составляющей часто пренебрегают, т.к. задержка распространения на малых расстояниях пренебрежимо мала по сравнению с задержкой на передачу и ожидание в узле связи. При построении сетей большой протяженности время распространения может составлять существенную долю задержки. Например, расстояние от Калининграда до Владивостока по прямой составляет примерно 7500 км, задержка распространения составит 37,5 мс, что может превышать другие составляющие. Другим примером может служить линия связи с использованием искусственного спутника земли (ИСЗ) протяженность которой может превышать 35000 км (высота орбиты, между наземными станциями более 70000 км), а время распространения более 200 мс.

Время передачи пакета определяется скоростью передачи данных по линии связи и длиной пакета

$$T_{tr} = \frac{L}{b}, \quad (2.3)$$

где  $b$  – скорость передачи данных (бит/с);

$L$  – размер пакета данных (бит).

Из сказанного следует, что время распространения – величина постоянная, по крайней мере, с достаточной для практических расчетов точностью. Если рассматривать стабильное состояние канала связи, при котором скорость передачи данных постоянна (обычно это допустимо для проводных технологий, но не всегда допустимо для беспроводных), то время передачи будет зависеть только от длины пакета. Длина пакета может быть различна для различных услуг. Поэтому, в общем случае, время передачи случайно.

Время ожидания в узле связи – это время, которое пакет проводит в очереди (буферной памяти) в ожидании передачи. Оно зависит от интенсивности трафика, времени передачи и других параметров, методы его оценки будут рассмотрены ниже. Это время также случайно.

Услуги современных сетей связи можно условно классифицировать на три группы: интерактивные, потоковые и фоновые.

*Интерактивные услуги* предполагают, что пользователь совершает активные действия и ожидает реакцию на них. Качество восприятия услуги зависит и задержки реакции на действие пользователя. В качестве примера такой услуги можно привести WEB-серфинг. Пользователь «кликает» ссылку на просматриваемой странице и ожидает загрузку очередной страницы, чем быстрее он получает данные, тем комфортнее воспринимается услуга.

*Потоковые услуги* предполагают, что пользователь передает или получает регулярный пакетов. Качество услуги определяется не только задержкой доставки пакета, но и изменением задержки для различных пакетов. В качестве примера можно привести услугу потокового видео (IPTV). Кодек на стороне отправителя формирует последовательность пакетов, каждый из пакетов должен быть доставлен получателю не позднее определенного времени, иначе произойдет остановка воспроизведения видео. Интервалы времени между пакетами на стороне получателя не должны значительно отличаться от интервалов на стороне отправителя. Это отличие определяется случайным характером задержки, т.к. каждый из пакетов может быть доставлен с разной величиной задержки.

*Фоновые услуги* не связаны с жесткими временными ограничениями. Примерами таких услуг могут быть электронная почта, загрузка файлов и др. В этом случае качество восприятия услуги определяется в основном временем необходимым для выполнения работы по доставке данных текстового сообщения или файла, т.е. скоростью передачи данных.

Следует заметить, что трафик, создается пользователем в сети не постоянно, а в течение времени предоставления услуги (время разговора, просмотра видео и т.д.). Назовем это время сессией. Таким образом, для различных услуг будут различные характеристики интенсивности и продолжительности сессий. Например, для услуги IP телефонии (передачи

речи VoIP) следует ожидать, что сессии будут аналогичны телефонным вызовам, производимым в сети с коммутацией каналов. Описать поток сессий можно интенсивностью нагрузки, аналогично описанию для сети с коммутацией каналов (1.1). Тогда интенсивность нагрузки для сессий будет равна

$$s = c\bar{t}, \quad (2.4)$$

где  $c$  – интенсивность сессий (сессий/час);

$\bar{t}$  – средняя продолжительность сессии (час).

Таким образом, общее время доставки пакета также является случайной величиной, зависящей от параметров сети и трафика. Иными словами, пакет доставляется получателю с некоторой случайной задержкой, кроме этого с некоторой вероятностью он может быть потерян на маршруте и вообще не будет доставлен получателю. Вполне логично ожидать, что оба эти явления влияют на качество восприятия услуги связи. С целью обеспечения и поддержания качества услуг введены показатели качества функционирования сети, которые определяют ряд параметров в наибольшей степени влияющих на качество восприятия услуг связи.

### *2.3 Показатели качества функционирования сетей передачи данных*

Исходя из свойств предоставляемых услуг Международным союзом электросвязи (ITU-T) в рекомендациях Y.1540 [6] и Y.1541 [7] был определен перечень параметров (показателей) качества функционирования сетей связи. Эти такие параметры как:

- средняя задержка доставки пакета данных (IPTD);
- вариация задержки доставки данных (джиттер) (IPDV);
- коэффициент потерь пакетов (IPLR);
- коэффициент ошибок (IPER).

Этот перечень показателей также закреплен отраслевым нормативным документом (Приказ №113 Минкомсвязи РФ от 2007 г. [3]).

Таблица 2.1 – Показатели качества функционирования

| №<br>п/п | Наименование<br>показателя                                                             | Тип передаваемого трафика |                                                                     |                       |                       |                                                                                                            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                                                                                        | Интерактивный             | Интерактивный<br>при<br>использовании<br>спутниковой<br>линии связи | Сигнальный            | Потоковый             | Трафик передачи<br>данных, за<br>исключением<br>интерактивного,<br>сигнального и<br>поточкового<br>трафика |
| 1        | Средняя задержка<br>передачи пакетов<br>информации, (мс)                               | не более<br>100           | не более 400                                                        | не более<br>100       | не более<br>400       | не более 1000                                                                                              |
| 2        | Отклонение от<br>среднего значения<br>задержки<br>передачи пакетов<br>информации, (мс) | не более<br>50            | не более 50                                                         | -                     | не более<br>50        | -                                                                                                          |
| 3        | Коэффициент<br>потери пакетов<br>информации                                            | не более<br>$10^{-3}$     | не более $10^{-3}$                                                  | не более<br>$10^{-3}$ | не более<br>$10^{-3}$ | не более $10^{-3}$                                                                                         |
| 4        | Коэффициент<br>ошибок в пакетах<br>информации                                          | не более<br>$10^{-4}$     | не более $10^{-4}$                                                  | не более<br>$10^{-4}$ | не более<br>$10^{-4}$ | не более $10^{-4}$                                                                                         |

Примечание - Интерактивный трафик – тип трафика, для которого характерно непосредственное взаимодействие (диалог) пользователей услугой связи или пользовательского (оконечного) оборудования. Потоковый трафик – тип трафика, для которого характерен просмотр и (или) прослушивание информации по мере ее поступления в пользовательское (оконечное) оборудование.

Как видно из приведенной таблицы для различных видов трафика (услуг) установлены различные нормативы на показатели качества функционирования.

#### 2.4 Исследование трафика передачи данных. Математические модели

Как и в случае сети с коммутацией каналов, основной задачей при проектировании сети передачи данных является обеспечение баланса между трафиком (спросом на услуги), объемом ресурсов сети (пропускной способностью) и качеством предоставления услуги (параметрами функционирования).

При решении данной задачи рассматривают два уровня (модели ВОС): сетевой и канальный.

*Сетевой уровень.* На сетевом уровне рассматриваются маршруты пропуска трафика в сети. Для этого сеть связи удобно описать моделью графа [5] (в данном случае неориентированного), в которой узлы сети (маршрутизаторы) соответствуют вершинам графа, а линии связи дугам графа, рисунок 2.3. В данном примере приведена структура сети,

включающая 8 узлов доступа (1, 2, 3, 4 и 9, 10, 11, 12) и 4 узла ядра сети (5, 6, 7, 8).

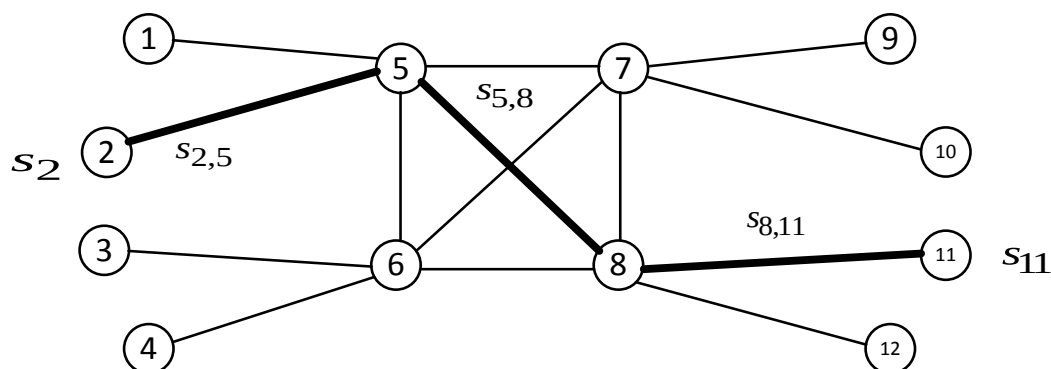


Рис.2.3 - Пример структуры сети

Каждое из ребер графа характеризуется интенсивностью нагрузки  $s_{i,j}$ . Значения интенсивностей нагрузки определяются распределением трафика в сети связи между окончными узлами (узлами доступа).

Интенсивность нагрузки, производимая пользователями, включенными в узел доступа  $i$ , зависит от спроса на услуги и набора предоставляемых услуг.

$$s_i = n_i^{(1)} s_0^{(1)} + n_i^{(2)} s_0^{(2)} + \dots + n_i^{(m)} s_0^{(m)}, \quad (2.5)$$

где  $n_i^{(j)}$  - количество пользователей  $j$ -й услуги, включенных в данный узел;

$n_i$  - общее количество пользователей, включенных в данный узел;

$m$  - количество предоставляемых услуг;

$s_0^{(j)}$  - удельная интенсивность сессий  $j$ -й услуги.

Доля трафика, производимого абонентами узла  $i$ , направляемая на узел  $j$  определяется коэффициентами распределения  $k_{ij}$ ,  $j=1\dots d$ , где  $d$  - количество направлений связи. В данном случае рассматриваются только окончные узлы или узлы, связывающие данную сеть с другой сетью.

Таким образом, данная модель сети позволяет создать описание сети в виде таблицы нагрузок между окончными узлами связи, в которой

$$S_{i,j} = s_i k_{ij} \quad (2.6)$$

Таблица 2.2 – Распределение трафика между окончными узлами

|    | 1          | 2          | 3          | 8          | 9          | 10          |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1  | $S_{1,1}$  | $S_{1,2}$  | $S_{1,3}$  | $S_{1,8}$  | $S_{1,9}$  | $S_{1,10}$  |
| 2  | $S_{2,1}$  | $S_{2,2}$  | $S_{2,3}$  | $S_{2,8}$  | $S_{2,9}$  | $S_{2,10}$  |
| 3  | $S_{3,1}$  | $S_{3,2}$  | $S_{3,3}$  | $S_{3,8}$  | $S_{3,9}$  | $S_{3,10}$  |
| 8  | $S_{8,1}$  | $S_{8,2}$  | $S_{8,3}$  | $S_{8,8}$  | $S_{8,9}$  | $S_{8,10}$  |
| 9  | $S_{9,1}$  | $S_{9,2}$  | $S_{9,3}$  | $S_{9,8}$  | $S_{9,9}$  | $S_{9,10}$  |
| 10 | $S_{10,1}$ | $S_{10,2}$ | $S_{10,3}$ | $S_{10,8}$ | $S_{10,9}$ | $S_{10,10}$ |

Аналогично на основе структуры сети и маршрутов пропуска трафика может быть построена и таблица нагрузок на линии связи.

Таблица 2.3 – Распределение нагрузки по линиям связи

|    | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7          | 8          | 9         | 10          | 11          | 12          |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 1  | $s_{1,1}$ |           |           |           | $s_{1,5}$ |           |            |            |           |             |             |             |
| 2  |           | $s_{2,2}$ |           |           | $s_{2,5}$ |           |            |            |           |             |             |             |
| 3  |           |           | $s_{3,3}$ |           |           | $s_{3,6}$ |            |            |           |             |             |             |
| 4  |           |           |           | $s_{4,4}$ |           | $s_{4,6}$ |            |            |           |             |             |             |
| 5  | $s_{5,1}$ | $s_{5,2}$ |           |           |           | $s_{5,6}$ | $s_{5,7}$  | $s_{5,8}$  |           |             |             |             |
| 6  |           |           | $s_{6,3}$ | $s_{6,4}$ | $s_{6,5}$ |           | $s_{6,7}$  | $s_{6,8}$  |           |             |             |             |
| 7  |           |           |           |           | $s_{7,5}$ | $s_{7,6}$ |            | $s_{7,8}$  | $s_{7,9}$ | $s_{7,10}$  |             |             |
| 8  |           |           |           |           | $s_{8,5}$ | $s_{8,6}$ | $s_{8,7}$  |            |           |             | $s_{8,11}$  | $s_{8,12}$  |
| 9  |           |           |           |           |           |           | $s_{9,7}$  |            | $s_{9,9}$ |             |             |             |
| 10 |           |           |           |           |           |           | $s_{10,7}$ |            |           | $s_{10,10}$ |             |             |
| 11 |           |           |           |           |           |           |            | $s_{11,8}$ |           |             | $s_{11,11}$ |             |
| 12 |           |           |           |           |           |           |            | $s_{12,8}$ |           |             |             | $s_{12,12}$ |

В данной таблице заполнены только те ячейки которые соответствуют имеющимся в структуре сети линиям связи между узлами сети.

Данные из таблицы 2.3 являются основой для следующего этапа расчета сети.

*Канальный уровень.* На данном уровне требуется оценить необходимую пропускную способность линий связи между узлами сети. Для этого необходимо знать интенсивность трафика, обслуживаемого линиями связи, которая получена на предыдущем этапе, и нормативы на качество обслуживания.

Задача решается методами теории телетрафика (теории массового обслуживания). На предыдущем шаге мы получили интенсивности нагрузки сессий  $s_{i,j}$ . Далее от полученных значений нагрузки необходимо перейти к интенсивности трафика (бит/с).

Если нам известны данные о предоставляемых услугах, интенсивности трафика, производимого этими услугами  $a_0^{(j)}$  – удельная интенсивность трафика, производимого  $j$ -й услугой (во время сессии), то общая интенсивность трафика может быть получена как

$$a_{ij} = v_{ij} \left( \eta_1 a_0^{(1)} + \eta_2 a_0^{(2)} + \dots + \eta_r a_0^{(r)} \right), \quad (2.7)$$

где  $v_{ij}$  – число сессий, которые требуется обслужить;

$a_0^{(j)}$  – удельная интенсивность трафика  $j$ -й услуги (бит/с);

$\eta_j$  – доля нагрузки сессий, производимой  $j$ -й услугой.

Значение  $v_{ij}$  фактически означает число сессий, обслуживание которого должна обеспечивать линия связи. Оно может быть определено аналогично тому, как определяется число необходимых каналов в сети с коммутацией каналов, т.е. с помощью 1-й формулы Эрланга (см. п.1). В



результате чего может быть получена таблица распределения трафика по линиям связи.

Таблица 2.4 – Распределение трафика по линиям связи

|    | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6 | 7         | 8 | 9 | 10 |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|---|---|----|
| 1  | $a_{1,1}$ |           |           | $a_{1,4}$ |           |   |           |   |   |    |
| 2  |           | $a_{2,2}$ |           | $a_{2,4}$ |           |   |           |   |   |    |
| 3  |           |           | $a_{3,3}$ | $a_{3,4}$ |           |   |           |   |   |    |
| 4  |           |           |           |           | $a_{4,5}$ |   | $a_{4,7}$ |   |   |    |
| 5  | $a_{5,1}$ | $a_{5,2}$ | $a_{5,3}$ |           |           |   |           |   |   |    |
| 6  |           |           |           |           | $a_{6,5}$ |   |           |   |   |    |
| 7  |           |           |           |           |           |   |           |   |   |    |
| 8  |           |           |           |           |           |   |           |   |   |    |
| 9  |           |           |           |           |           |   |           |   |   |    |
| 10 |           |           |           |           |           |   |           |   |   |    |

Данные из этой таблицы являются основой для следующего этапа расчета.

Поток пакетов рассматривается как случайный поток заявок на обслуживание, линия связи рассматриваются как обслуживающее устройство, которое занимаются передаваемыми пакетами на некоторое случайное время, равное времени передачи пакета. Модель такой системы должна описывать взаимодействие двух случайных процессов: процесса поступления заявок и процесса освобождения, т.е. является моделью системы массового обслуживания (СМО). При поступлении заявки в момент, когда устройство занято, заявка ставится на ожидание. Когда число ожидающих заявок достигло некоторого заданного значения (размера буфера), заявка теряется. Такая дисциплина обслуживания называется комбинированной дисциплиной обслуживания (с ожиданием и отказами). Цель построения математической модели в том, чтобы связать интенсивность трафика, пропускную способность канала со временем ожидания и вероятностью потерь (отказов).

Подробно модели СМО описаны, например, в [2, 8, 9]. Здесь рассмотрим лишь основные свойства некоторых из них.

Модели СМО связывают показатели качества с параметрами потока заявок и характеристиками процесса их обслуживания. Они разработаны для потоков и процессов, имеющих определенные свойства. Поэтому, выбор той или иной модели зависит от свойств тех процессов, которые она должна описывать.

**1. Модель потока заявок.** Модель потока пакетов (потока заявок) в сетях передачи данных обычно описывают моделью случайного потока.

Из теории телетрафика (массового обслуживания) известны решения для некоторых видов случайных потоков и моделей СМО.

Наибольшее число известных решений связано с моделью простейшего потока.

Простейший поток заявок представляет собой временную последовательность независимых случайных событий. Под событием понимается поступление вызова. Этот поток имеет три свойства:

- стационарный;
- ординарный;
- без последдействия.

Стационарность потока – вероятность поступления  $k$  заявок за интервал времени  $\tau$  зависит только от величины этого интервала и не зависит от того, где на оси времени он выбран.

Ординарность потока - вероятность поступления двух и более заявок за интервал времени, стремящийся к нулю, тоже стремится к нулю.

Отсутствие последдействия – независимость настоящего от прошлого, т.е. процесс поступления заявок не зависит ни от процесса поступления до настоящего момента, ни от состояния системы обслуживания.

Для простейшего потока вероятность поступления  $k$  заявок за интервал времени  $t$  является случайной величиной, имеющей распределение Пуассона

$$p_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (2.8)$$

где  $\lambda$  - интенсивность потока (заявок/ед. времени).

Интервалы времени между заявками в таком потоке также случайны и имеют экспоненциальное распределение вероятности

$$f(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2.9)$$

**2. Модель процесса обслуживания.** В этой модели предполагается, что обслуживающее устройство (канал) занимается заявкой на случайное время.

**3. Время задержки пакета** (в очереди на обслуживание). В условиях описанных моделей среднее время задержки пакета на участке сети определяется формулой Поячека-Хинчина [2, 8, 9]

$$T = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \right) + \bar{t}, \quad (2.10)$$

где  $\rho = a\bar{t}$ ;

$a$  – интенсивность пакетов;

$\bar{t} = \frac{\bar{L}}{b}$  – среднее время обслуживания пакета;

$\sigma^2$  - дисперсия времени обслуживания;

$\bar{L}$  - средняя длина пакета (бит);

$b$  – скорость передачи (бит/с).

В частных случаях, например, когда время обслуживания имеет экспоненциальное распределение, то  $\frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 1$ , тогда

$$T_{exp} = \frac{\bar{t}}{1-\rho}. \quad (2.11)$$

Когда время обслуживания постоянно, то  $\sigma^2 = 0$

$$T_D = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} + \bar{t} \quad (2.12)$$

Если свойства потока отличаются от простейшего, то может быть применена приближенная формула [8]

$$T_G = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \left( \frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left( \frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (2.13)$$

где  $\sigma_a^2$ ,  $\sigma_s^2$  - дисперсии интервалов времени между пакетами и времени обслуживания, соответственно;

$\bar{a}$  - среднее значение интервала между пакетами;

$\bar{t}$  - среднее время обслуживания.

**4. Вероятность отказов** (потерь пакетов). В общем случае, для оценки вероятности потерь может быть использована приближенная формула [9]

$$p = \frac{1-\rho}{2} \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b} \frac{1}{1 - \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b + 1}}, \quad (2.14)$$

где  $C_a^2$  и  $C_s^2$  - квадратичные коэффициенты вариации соответственно распределений входящего потока и времени обслуживания;

$n_b$  - размер буфера,  $\rho$  - загрузка системы.

Таким образом, алгоритм расчета пропускной способности для сети с коммутацией пакетов можно определить следующим образом:

1. Вычислить интенсивность нагрузки, производимой в конечных узлах связи (сессий).
2. Вычислить таблицу распределения нагрузки между конечными узлами связи.
3. Вычислить таблицу распределения нагрузки по имеющимся линиям связи.
4. Вычислить таблицу распределения интенсивностей трафика по имеющимся линиям связи.

5. Для полученных значений интенсивностей трафика и заданной величины задержки вычислить требуемые пропускные способности линий связи.

6. Проверить выполнение норм по коэффициенту потерь пакетов.

### *2.5 Контрольные вопросы по изучаемой теме*

1. Структура сетей с коммутацией пакетов. Классификация сетей по их масштабу.

2. Трафик в сетях передачи данных. Пакеты данных. Маршруты доставки данных.

3. Понятие задержки (времени) доставки пакета, основные составляющие времени доставки.

4. Услуги связи, реализуемые сетями передачи данных. Классификация услуг.

5. Основные показатели качества функционирования сети передачи данных, определенные в нормативных документах и международных рекомендациях ИТУ-Т.

6. Влияние показателей качества функционирования сети передачи данных на основные виды услуг связи.

7. Математические модели сетевого уровня сети передачи данных.

8. Математические модели канального уровня сети передачи данных.

9. Математические модели потоков трафика.

10. Математические модели процесса обслуживания.

11. Математические модели сети как системы массового обслуживания.

## **3 Оценка надежности сети связи**

### *3.1 Показатели надежности*

Одним из основных показателей надежности сети связи является коэффициент готовности, который характеризует вероятность исправного состояния технических средств, необходимых для установления соединения (связи) между двумя абонентами. Коэффициент готовности за относительно продолжительный интервал времени численно равен отношению времени исправного состояния  $T_{\text{и}}$  к общей продолжительности интервала. При этом полагают, что система может находиться либо в исправном состоянии  $T_{\text{и}}$ , либо в состоянии восстановления  $T_{\text{в}}$ .

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_{\text{в}}} \quad (3.1)$$

На достаточно длительном интервале времени значение коэффициента готовности стремится к вероятности исправного состояния.

Отказы отдельных элементов сети (узлов и линий связи) не всегда приводят к невозможности установления соединения, т.к. в сети может

быть выбран альтернативный маршрут для установления соединения. Поэтому, при оценке надежности сети связи рассматривают, так называемую, структурную надежность, т.е. способность сети выполнять свои функции при отказе некоторых ее элементов.

Для услуги связи установлены отраслевые нормативы на коэффициент готовности (ГОСТ Р 53111- 2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования» [4], Приказ №113 Минкомсвязи РФ от 27.09.2007 г.[3]).

Таблица 3.1 – Нормативы на коэффициент готовности

| № п/п | Тип сети электросвязи                               | Наименование показателя          | Норма           |
|-------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1     | Сеть междугородной и международной телефонной связи | Коэффициент готовности ( $K_r$ ) | не менее 0,999  |
| 2     | Сеть зонной телефонной связи                        |                                  | не менее 0,9995 |
| 3     | Сеть местной телефонной связи                       |                                  | не менее 0,9999 |
| 4     | Телеграфная сеть связи и сеть Телекс                |                                  | не менее 0,9999 |
| 5     | Сеть передачи данных                                |                                  | не менее 0,99   |

### 3.2 Проблемы и методы оценки надежности

Оценка надежности сетевой структуры, в общем случае, является довольно трудоемкой задачей, требующей большого объема вычислений. Методы оценки надежности таких структур основаны на методах теории графов, алгебры логики и теории вероятностей. На практике для оценки надежности сетевых структур могут использоваться как аналитические методы, разработанные на их основе вычислительные программы, так и различные численные методы имитационного моделирования. В ряде случаев задача может быть сведена к расчетам надежности простых сетевых структур или к оценке интервала, в который попадает значение надежности, для структур, не приводимых к простой форме.

Для оценки надежности сети связи, как правило, требуется расчет надежности функционирования сети, при котором обеспечивается связь между двумя абонентами или узлами сети. Сложность выполнения этой задачи определяется структурой рассматриваемой сети и требованиями к точности получаемых оценок. Сложности, возникающие при оценке надежности сети, объясняются наличием некоторого количества путей пропуска трафика между рассматриваемыми узлами, которые в общем случае могут быть зависимыми, т.е. содержат общие сетевые элементы. В таком случае выход из строя общего элемента приводит к отказу зависимых всех этих путей. Поэтому расчет надежности для таких структур сети может потребовать значительного объема вычислений. Более подробно о методах оценки надежности можно прочитать,

например, в [10]. Здесь рассмотрим лишь основные простейшие структуры соединения сетевых элементов, которые могут встретиться при расчете надежности сетей связи.

### 1. Последовательная и параллельная структуры

Надежность последовательной структуры может быть определена в виде схемы, представленной на рисунке 3.1.

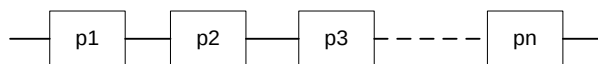


Рис. 3.1 - Последовательная структура

Последовательная структура имеет только один маршрут пропуска трафика, который образован некоторым множеством сетевых элементов. Надежность последовательной структуры определяется вероятностью одновременного исправного состояния всех элементов:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (3.2)$$

где  $p_i$  - вероятность исправного состояния  $i$  - го элемента;  
 $n$  - число последовательных элементов.

Любой путь пропуска трафика в сети может быть представлен в виде последовательной структуры, элементами которой являются элементы сети (узлы и линии связи).

Надежность параллельной структуры может быть определена в виде схемы, представленной на рисунке 3.2.

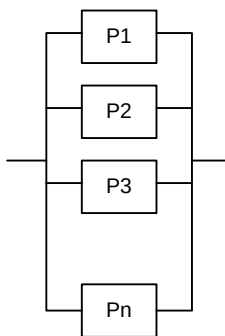


Рис. 3.2 - Параллельная структура

В параллельной структуре имеется множество независимых путей пропуска трафика, каждый из которых представляется как один элемент. Выход из строя любого элемента приводит к отказу соответствующего пути, но ни как не влияет на остальные элементы структуры. Вероятность исправного состояния параллельной структуры определяется вероятностью исправного состояния хотя бы одного из ее элементов:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (3.3)$$

где  $P_i$  - вероятность исправного состояния  $i$  - го элемента;  
 $n$  - число параллельных элементов.

Параллельная структура встречается на участках сети, где имеются параллельные линии связи или маршруты.

**Мостовая структура.** Мостовая структура представляет собой простейшую структуру, имеющую зависимые пути пропуска трафика, и не может быть сведена к последовательной и параллельной структурам – рисунок 3.3.

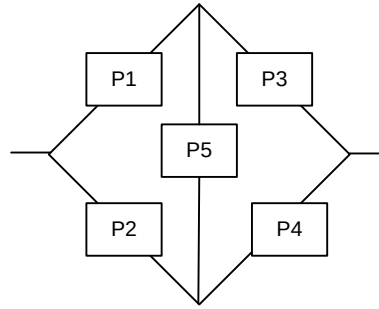


Рис. 3.3 - Пример мостовой структуры

Схема содержит 5 элементов и имеет 4 возможных пути пропуска трафика:

1.  $e_1 e_3$
2.  $e_2 e_4$
3.  $e_1 e_5 e_4$
4.  $e_2 e_5 e_3$ .

Пути 1 и 2 являются независимыми. Каждый из них представляет собой последовательное включение двух элементов, а вероятность их исправного состояния определяется, как  $P_1 P_3$  и  $P_2 P_4$  соответственно. Пути 3 и 4 содержат общий элемент  $e_5$ , отказ которого приводит к отказу обоих этих путей, т.е. пути 3 и 4 являются зависимыми. Для расчета надежности такой схемы может быть использован, например, метод замещения.

**2. Метод прямого замещения.** Метод замещения заключается в следующем. Опишем вероятность работы мостовой схемы с помощью условных вероятностей.

$$P = p_5 P(W | e_5) + q_5 P(W | \bar{e}_5), \quad (3.4)$$

где  $P_5$  - вероятность рабочего состояния элемента сети  $e_5$ ;

$q_5 = 1 - P_5$  - вероятность отказа элемента сети  $e_5$ ;

$P(W | e_5)$  - вероятность работы системы, при условии, что элемент сети  $e_5$  работает;

$P(W | \bar{e}_5)$  - вероятность работы системы, при условии, что элемент сети  $e_5$  не работает.

Эквивалентная схема для случая, когда элемент  $e_5$  работает, приведена на рисунке 3.4а, а для случая, когда элемент  $e_5$  не работает на рисунке 3.4б.

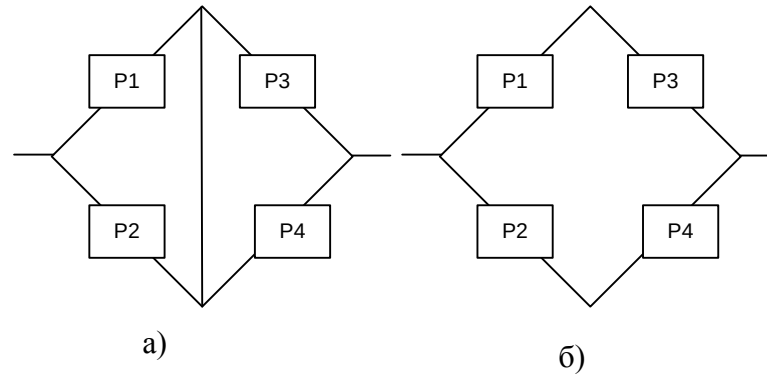


Рис. 3.4 - Эквивалентные схемы для случаев, когда элемент  $x_5$  работает (а), и  $x_5$  не работает (б)

$$P(W | e_5) = (1 - q_1 q_2)(1 - q_3 q_4)$$

$$P(W | \bar{e}_5) = 1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_4)$$

Тогда вероятность работы мостовой схемы можно записать как

$$P = p_5(1 - q_1 q_2)(1 - q_3 q_4) + q_5(1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_4)), \quad (3.5)$$

если все вероятности равны  $P$

$$P = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

**3. Метод декомпозиции.** Метод декомпозиции заключается в замене фрагмента сетевой структуры одним элементом, надежность которого равна надежности заменяемого фрагмента сети.

Данная структура представляет собой комбинацию параллельных и последовательных структур. Пример такой структуры приведен на рисунке 3.5.

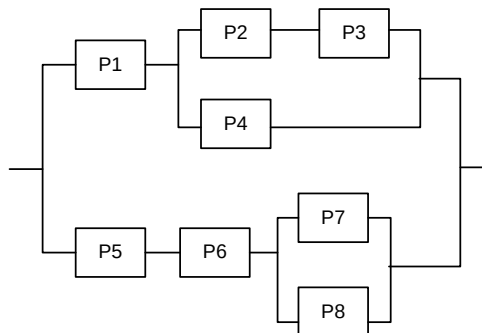


Рис. 3.5 - Пример комбинированной структуры



Для оценки надежности данной структуры можно использовать метод декомпозиции. В структуре выделяются блоки с последовательным и параллельным включением элементов. На рисунках 3.6а, 3.6б, 3.6в, 3.7г приведен пример последовательной декомпозиции блоков схемы рисунка 3.5.

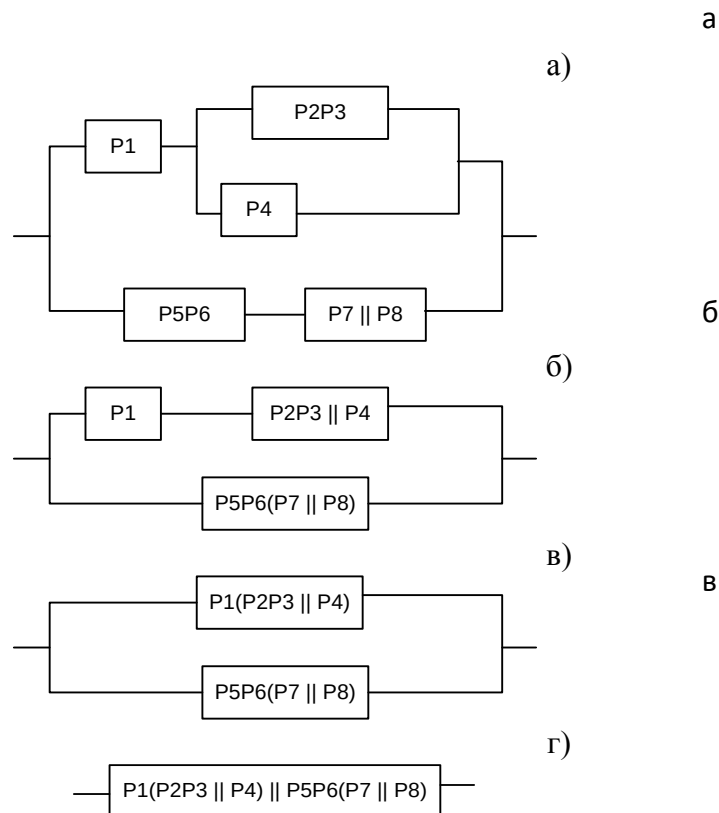


Рис. 3.6 - Пример декомпозиции

Полученное в результате выражение  $p_1(p_2 p_3 \parallel p_4) \parallel p_5 p_6(p_7 \parallel p_8)$ , с учетом формул (3.2) и (3.3) может быть использовано для вычисления надежности данной структуры.

$$p_2 p_3 \parallel p_4 = 1 - (1 - p_2 p_3)(1 - p_4)$$

$$p_7 \parallel p_8 = 1 - (1 - p_7)(1 - p_8)$$

Тогда надежность схемы (вероятность безотказной работы), приведенной на рис. 3.3 будет равна:

$$\begin{aligned} P &= p_1(1 - (1 - p_2 p_3)(1 - p_4)) \parallel p_5 p_6(1 - (1 - p_7)(1 - p_8)) = \\ &= 1 - (1 - p_1(1 - (1 - p_2 p_3)(1 - p_4)))(1 - p_5 p_6(1 - (1 - p_7)(1 - p_8))) \end{aligned}$$

Метод декомпозиции нагляден и не вызывает трудностей для сетевых структур, в которых рассматриваемые пути не имеют общих элементов.

Таким образом, можно сформулировать следующие рекомендации по применению метода декомпозиции при расчете надежности сети.

Методические рекомендации по использованию метода декомпозиции

1. Оценить сетевую структуру рассматриваемых путей пропуска трафика. Если рассматриваемые пути не содержат общих элементов, то следует воспользоваться методом декомпозиции.

2. Для рассматриваемых путей пропуска трафика необходимо построить вероятностную модель, содержащую все элементы путей.

3. В полученной модели последовательно выделяются блоки с последовательным и параллельным подключением сетевых элементов.

4. В полученной модели последовательно выделяются блоки с мостовыми структурами, выполняется их декомпозиция.

5. Метод декомпозиции повторяется до тех пор, пока в результате не будет получено одно выражение, описывающее надежность структуры.

6. На основе полученного выражения, с использованием формул (3.2) и (3.3) для последовательного и параллельного включения элементов, вычисляется значение вероятности пропуска трафика в рассматриваемом направлении.

### *3.3 Контрольные вопросы по изучаемой теме*

1. Показатели надежности. Структурная надежность.

2. Нормативные документы, определяющие требования к надежности сети связи.

3. Коэффициент готовности, определение, вероятностный смысл.

4. Связь коэффициента готовности с наработкой на отказ и временем восстановления.

5. Метод оценки коэффициента готовности простейших структур. Последовательная и параллельная структуры.

6. Метод прямого замещения. Мостовая структура.

7. Метод декомпозиции.

## **4 Анализ трафика передачи данных**

### *4.1 Оценка параметров по результатам наблюдений. Применение теории измерений и статистических методов*

Единственным способом получения сведений о характеристиках трафика в сети связи (в данном случае сети передачи данных) является проведение измерений. Способ проведения измерений существенно влияет на дальнейшую возможность использования и обработки полученных результатов. Поэтому, для проведения измерений составляется план, который включает в себя достаточно детальное описание: точки сбора данных, типа наблюдений, регистрируемых параметров, времени, продолжительности (возможно периодичности), объема получаемых

результатов измерений (объема выборки). Для обработки данных измерений используются методы математической статистики. Абсолютно точные значения измеряемых параметров получить невозможно, поэтому, результатом обработки являются оценки параметров, полученные с требуемой величиной абсолютной или относительной ошибки при заданной величине доверительной вероятности. По результатам измерений могут быть построены функциональные зависимости и распределения вероятности.

При исследовании свойств трафика наибольший интерес представляют такие параметры как: интенсивность пакетов, интенсивность трафика (бит/с), длина пакета, доля потерянных пакетов, доля пакетов с ошибками, интервал времени между пакетами. Из функциональных зависимостей, в первую очередь, представляют интерес функции распределения (или плотности вероятности) интервалов времени между пакетами и длины пакетов.

В теории измерений [40] есть понятия генеральной совокупности и выборочной совокупности. В нашем случае, генеральная совокупность это все значения исследуемой величины, которые имеют место при работе сети связи, т.е. весь трафик. Оценки параметров получают по выборочной совокупности (далее просто выборке), т.е. ограниченному количеству значений, получаемых во время измерений. В таком случае говорят, что проводятся выборочные измерения.

Для оценки параметров, как правило, используют интервальные оценки, т.к. они отражают точность полученного результата.

Например, в результате измерений интенсивности пакетов получена выборка из  $N$  значений измерений ( $n_1, n_2, \dots, n_N$ ) за периоды равные 1 с, тогда среднее значение интенсивности пакетов может быть вычислено как

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i. \quad (4.1)$$

Среднеквадратическое (стандартное) отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{\lambda})^2}{N-1}}. \quad (4.2)$$

Интервальная оценка определится как

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm t_{N, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (4.3)$$

где  $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$  - коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности  $1 - \frac{\alpha}{2}$ ;

$\alpha$  - вероятность того, что средняя величина лежит за пределами доверительного интервала. Часто эту вероятность принимают равной 0,1 или 0,05. Этот коэффициент учитывает ошибку, вносимую конечным размером выборки (данных измерений) по которой оценивается среднее значение для всей генеральной совокупности, т.е. для трафика. Величина его зависит от выбранной доверительной вероятности и размера выборки.

Из (4.3) видно, что ширина доверительного интервала тем меньше, чем больше размер выборки  $N$  и чем меньше среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . Ширина доверительного интервала характеризует точность получаемой оценки. Величина среднеквадратического отклонения  $\sigma$  определяется свойствами измеряемой величины, а размер выборки  $N$  условиями измерений. Поэтому, при проведении измерений размер выборки имеет большое значение, т.к. непосредственно влияет на точность получаемых результатов.

Относительная ошибка (иногда говорят точность) для такой оценки будет равна отношению ширины доверительного интервала к среднему значению

$$\delta = \frac{t_{N,1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\bar{\lambda}}}{\bar{\lambda}}. \quad (4.4)$$

Часто  $\delta$  приводят в %, тогда величину (4.4) нужно просто умножить на 100.

Если оценку нужно получить с заданной точностью (величиной относительной ошибки  $\delta_0$ ), то необходимый размер выборки можно оценить как

$$N = \left( t_{N,1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\bar{\lambda} \delta_0} \right)^2. \quad (4.5)$$

Следует заметить, что в выражении (4.5) присутствуют средние величины  $\bar{\lambda}$  и  $\sigma$ , которые требуется оценить по результатам измерений. Поэтому, в практических задачах сначала производят предварительную оценку средней величины  $\bar{\lambda}$  и стандартного отклонения  $\sigma$ , по выборке произвольного размера, получают их ожидаемые значения, а затем выполняют расчет уточненного размера выборки, используя эти значения.

Если размер выборки достаточно большой (практически, как правило, более 100 значений), то в формулах (4.3), (4.4) и (4.5) коэффициент Стьюдента заменяют коэффициентом нормального распределения  $g_{1-\frac{\alpha}{2}}$ , величина которого не зависит от размера выборки.

## 4.2 Исследование функций распределения

По определению [39] функция распределения вероятности это вероятность того, что случайная величина не превысит некоторого значения

$$F(a) = p(a_0 < a). \quad (4.6)$$

Для исследования функции распределения измеряемой величины строят гистограмму, которая представляет собой эмпирическую (экспериментальную) функцию распределения или плотности вероятности. Например, в результате измерений получена выборка из  $N$  значений интервалов времени между моментами поступления пакетов  $A =$

$\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ . Требуется построить плотность распределения вероятности интервала времени между пакетами.

Найдем минимальное и максимальное значения из выборки  $a_{min} = \min\{A\}$  и  $a_{max} = \max\{A\}$ , затем найдем интервал изменения величины

$$\Delta a = a_{max} - a_{min}. \quad (4.7)$$

Выберем число интервалов для представления данных, равное  $r$  и определим ширину интервала  $h$

$$h = \frac{\Delta a}{r} \quad (4.8)$$

Обычно  $r$  выбирают в пределах от 10 до 30. Слишком малое количество интервалов не дает достаточно точного представления о виде функции, слишком большое требует большого объема выборки, т.к. в каждый из интервалов должно попадать достаточное количество результатов измерений (обычно не менее 10).

Далее все результаты измерений распределяются по интервалам в зависимости от их значений, и подсчитывается количество в каждом из интервалов  $n_i$  и вероятность попадания значения в интервал  $p_i = n_i/N$ , где  $N$  общее количество значений. Данные гистограммы приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Данные гистограммы

| Номер интервала | Начало интервала     | Конец интервала | Количество попаданий в интервал | Вероятность попадания в интервал | $f(a)$  |
|-----------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|---------|
| 1               | $a_{min}$            | $a_{min} + h$   | $n_1$                           | $p_1 = n_1/N$                    | $p_1/h$ |
| 2               | $a_{min} + h$        | $a_{min} + 2h$  | $n_2$                           | $p_2 = n_2/N$                    | $p_2/h$ |
| ...             | ...                  | ...             | ...                             | ...                              | ...     |
| $I$             | $a_{min} + ih$       | $a_{min} + ih$  | $n_i$                           | $p_i = n_i/N$                    | $p_i/h$ |
| ...             | ...                  | ...             | ...                             | ...                              | ...     |
| $R$             | $a_{min} + (r - 1)h$ | $a_{min} + rh$  | $n_r$                           | $p_r = n_r/N$                    | $p_r/h$ |
| $\Sigma$        |                      |                 | $N$                             | 1                                | $1/h$   |

Значение в столбце 6 таблицы 4.1 - это значение эмпирической функции плотности вероятности.

### 4.3 Пример выборочного анализа трафика. Статистическая обработка результатов измерений

#### 4.3.1 Оценка параметров трафика

Например, на уровне пользователя получены данные измерений входящего трафика VoIP за интервал 71 с - 2582 пакетов. Также получены значения числа пакетов за интервал 1 с (71 значение).

Среднее значение интенсивности пакетов составляет

$$\bar{\lambda} = 2582/71 = 36,37 \text{ пакетов/с.}$$

Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = 19,50 \text{ пакетов/с.}$$

Для уровня доверительной вероятности 0,9 ( $\alpha = 0,1$ ) полуширина доверительного интервала будет равна

$$t_{71, 1-\frac{0,1}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{2582}} = 1,67 \frac{19,50}{\sqrt{71}} = 3,86 \text{ пакетов/с.}$$

Ширина доверительного интервала превышает единицу, округлим ее до целого значения (4,0).

Тогда оценка интенсивности пакетов может быть записана как

$$\lambda = 36 \pm 4,0 \text{ пакетов/с.}$$

Относительная ошибка результата составляет

$$\delta = 100 \frac{4,0}{36} = 11\%.$$

Если ошибка превышает заданное значение, то нужно увеличить размер выборки. Например, если задана величина допустимой ошибки 5% (0,05), то требуемый объем выборки, согласно (4.5) составит

$$N = \left( t_{N, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\lambda \delta_0} \right)^2 = \left( 1,67 \frac{19,50}{36,37 \cdot 0,05} \right)^2 = 320,68 \approx 321 \text{ значение.}$$

Таким образом, для обеспечения требуемой точности придется повторить измерения и при этом получить выборку размером не менее 321 значения.

Среднее значение интервала времени между пакетами по полученным результатам составляет

$$\bar{a} = 0,028 \text{ с.}$$

Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = 0,062 \text{ с.}$$

Коэффициент вариации

$$C = \frac{\sigma}{\bar{a}} = \frac{0,062}{0,028} = 2,21.$$

Для уровня доверительной вероятности 0,9 ( $\alpha = 0,1$ ) полуширина доверительного интервала будет равна

$$g_{1-\frac{0,1}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{2582}} = 1,64 \frac{0,062}{\sqrt{2582}} = 0,002 \text{ с.}$$

Тогда оценка интенсивности пакетов может быть записана как

$$a = 0,028 \pm 0,002 \text{ с.}$$

Относительная ошибка результата составляет

$$\delta = 100 \frac{0,002}{0,028} = 7,1\%.$$

Аналогично, если ошибка превышает заданное значение, то нужно увеличить размер выборки. Например, если задана величина допустимой ошибки 5% (0,05), то требуемый объем выборки, согласно (4.5) составит

$$N = \left( g_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\lambda \delta_0} \right)^2 = \left( 1,64 \frac{0,062}{0,028 \cdot 0,05} \right)^2 = 3710,6 \approx 3711 \text{ значений.}$$

Таким образом, для обеспечения требуемой точности придется повторить измерения и при этом получить выборку размером не менее 3711 значений.

#### 4.3.2 Построение и анализ гистограммы

По полученным данным требуется построить эмпирическую плотность вероятности для интервалов времени между пакетами (гистограмму). Найдем максимальное и минимальное значения из 2582 значений.

$$a_{max} = 3,03476 \text{ с}$$

$$a_{min} = 0,00006 \text{ с.}$$

Найдем разброс значений

$$\Delta a = a_{max} - a_{min} = 3,0347 \approx 3 \text{ с.}$$

Выберем 20 интервалов для построения гистограммы, тогда ширина интервала составит

$$h = \frac{\Delta a}{r} = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ с.}$$

Распределим данные по интервалам и оценим долю данных, попадающих в каждый из интервалов.

Полученный результат показал, что в первый интервал попало более 99% наблюдений, это говорит о том, что выбран слишком большой диапазон представления данных. Если построить такую гистограмму, то она не будет показательной. Будем считать, что диапазон представления данных должен включать не все, а большую долю данных (будем считать не менее 95%). Тогда исходя из полученной оценки среднего значения 0,028 с, предположим, что это середина диапазона представления данных. Сделаем попытку выбрать другое значение  $\Delta a_1 = 0,028 \cdot 2 = 0,056 \text{ с}$ . Тогда новое значение ширины интервала составит

$$h = \frac{0,056}{20} = 0,0028 \approx 0,003 \text{ с.}$$

Проверим какое количество данных попадает в диапазон от 0 до 0,056 с. Для данных измерений оказалось, что в этот диапазон попадают более 98% значений, следовательно, это нас устраивает.

Данные гистограммы поместим в таблицу 4.2.

Мы выбрали 20 интервалов, в них попало более 98% данных, однако часть данных (менее 2%) не будет отражена на гистограмме. Поэтому добавим еще один 21-й интервал, который будет отличаться от остальных по длительности. Конец 20-го интервала 0,060 с, а 21-й будет от 0,060 до 3,04 с и будет отражать все оставшиеся данные.

Таблица 4.2 – Данные гистограммы

| Номер интервала | Начал интервала | Конец интервала | Количество попаданий в интервал | Вероятность попадания в интервал | $f(a)$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|--------|
| 1               | 0,000           | 0,003           | 28                              | 0,0048                           | 1,6    |
| 2               | 0,003           | 0,006           | 8                               | 0,0014                           | 0,5    |
| 3               | 0,006           | 0,009           | 6                               | 0,0010                           | 0,3    |
| 4               | 0,009           | 0,012           | 5                               | 0,0009                           | 0,3    |
| 5               | 0,012           | 0,015           | 23                              | 0,0039                           | 1,3    |
| 6               | 0,015           | 0,018           | 254                             | 0,0433                           | 14,4   |
| 7               | 0,018           | 0,021           | 1911                            | 0,3260                           | 108,7  |
| 8               | 0,021           | 0,024           | 111                             | 0,0189                           | 6,3    |
| 9               | 0,024           | 0,027           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 10              | 0,027           | 0,030           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 11              | 0,030           | 0,033           | 1                               | 0,0002                           | 0,1    |
| 12              | 0,033           | 0,036           | 14                              | 0,0024                           | 0,8    |
| 13              | 0,036           | 0,039           | 34                              | 0,0058                           | 1,9    |
| 14              | 0,039           | 0,042           | 145                             | 0,0247                           | 8,2    |
| 15              | 0,042           | 0,045           | 4                               | 0,0007                           | 0,2    |
| 16              | 0,045           | 0,048           | 1                               | 0,0002                           | 0,1    |
| 17              | 0,048           | 0,051           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 18              | 0,051           | 0,054           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 19              | 0,054           | 0,057           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 20              | 0,057           | 0,060           | 0                               | 0,0000                           | 0,0    |
| 21              | 0,060           | 0,304           | 18                              | 0,0039                           | 1,3    |
| $\Sigma$        |                 |                 | 2582                            | 1                                | 10     |

Гистограмма, полученная по этим данным приведена на рисунке 4.1.

Аналогично может быть построена и гистограмма для распределения длительности пакетов.

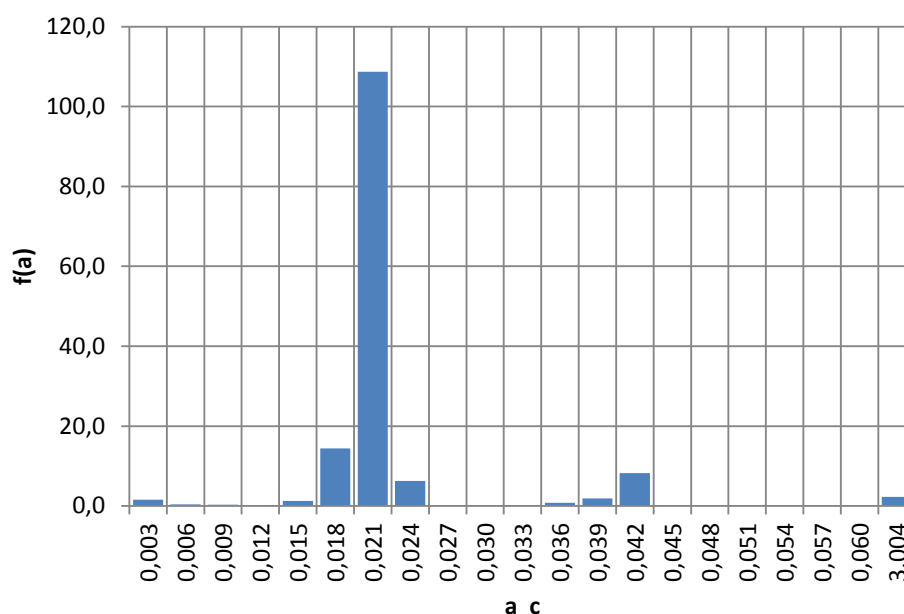


Рис. 4.1 - Эмпирическая плотность вероятности интервала времени между пакетами



#### 4.4 Контрольные вопросы по изучаемой теме

1. Анализ параметров трафика по результатам наблюдений. Выбор наблюдаемых параметров, план проведения наблюдений.
2. Абсолютная и относительная ошибка оценок параметров трафика.
3. Точечные оценки параметров. Среднее значение, стандартное отклонение.
4. Интервальные оценки параметров трафика. Доверительный интервал. Доверительная вероятность.
5. Зависимость ширины доверительного интервала от требуемой точности оценки.
6. Вычисление размера выборки для заданной точности оценок.
7. Поточковые свойства трафика.
8. Исследование потоковых свойств трафика по результатам наблюдений.
9. Исследование функции распределения интервалов времени между пакетами.
10. Исследование распределения размера пакетов.
11. Построение гистограмм по результатам наблюдений.
12. Проверка гипотезы о функции распределения.

### Литература

1. Б.С. Гольдштейт, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский Сети связи. СПб. «БХВ-Петербург», 2010 г.
2. Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич Теория телетрафика. М. «Связь», 1979 г.
3. Приказ №113 Минкомсвязи РФ от 27.09.2007 г.
4. ГОСТ Р 53111- 2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования».
5. М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы. М. «РХД», 2001 г.
6. Рекомендация ITU-T Y.1540
7. Рекомендация ITU-T Y.1541
8. Л. Клейнрок Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
9. Н.Б. Зелигер, О.С. Чугреев, Г.Г. Яновский Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. М.: «Радио и связь», 1984 г. – С. 177.
10. А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Е.А. Кучерявый. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта – М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. – 290 с.

11. Алиев Т.И. Сети ЭВМ и телекоммуникации. -СПб:СПбГУ ИТМО, 2011, - с.400
12. Давыдов Е.Б., Шапаренко Ю.М., Давыдов А.Е. Проблемы разработки и проектирования защищенной телекоммуникационной системы // Успехи современной науки - 2016. - Т. 1. - № 3. - С. 92-97
13. Бескид П.П., Суходольский В.Ю., Шапаренко Ю.М. Проектирование защищённых информационных систем. Часть 1. Конструкторское проектирование. Защита от физических полей. // Учебное пособие - 2008
14. Давыдов А.Е. Перспективные направления развития отрасли в области телекоммуникационного оборудования // Инновационные радиоэлектронные технологии — регионам России: труды XII отраслевой научно-технической конференции. — Ялта, 2014.
15. Давыдов А.Е., Техничко-экономические аспекты импортозамещения средств связи / Давыдов, А.Е., Смирнов, П.И. // Эффективность автоматизированных систем управления авиацией, систем связи и радиотехнического обеспечения: труды ЦНИИ ВВС. — 2015. — Вып. III. — Ч. 2. — С. 102—109.
16. А.Е. Давыдов, Р.В. Максимов, О.К. Савицкий Безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011- 192с.
17. А.Е. Давыдов, Р.В. Максимов, О.К. Савицкий Технические средства и методы защиты информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации / - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012- 194с.
18. Смирнов, П.И. Техничко-экономические и нормативные аспекты импортозамещения телекоммуникационного оборудования / П. И. Смирнов //
19. Смирнов, П. И. Аспекты импортозамещения в отрасли инфокоммуникаций / Смирнов П. И., Филиппов А.А.// Советник Президента. — 2014. — № 131.
20. Смирнов, П.И. Телекоммуникационное оборудование для развития сетей связи Республики Крым / П.И. Смирнов, А.А. Филиппов // Экспертный союз. 2015.- №3.-
21. С.П. Воробьев, А.Е. Давыдов, В.И. Курносков Жизненный цикл инфокоммуникационных сетей. – М. Управление делами президента Российской Федерации. – 2012.
22. Щеглов, А.Ю. Основы теории надежности СЗИ. Назначение средств добавочной защиты / А.Ю. Щеглов // Журнал Защита информации. Конфидент.- 2003.-№4.-С34-37.
23. Щеглов, А. Ю. Исследование эффективности обслуживания заявок в ЛВС реального времени по приоритетным расписаниям / А. Ю. Щеглов // ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл № ФС 77 - 48211. ISSN 1994-0408.

24. Щеглов А. Ю. Принципы обслуживания заявок в вычислительных системах с динамическими относительными приоритетами // Информационные технологии. 1997. № 8. С. 17—21.
25. Щеглов А. Ю. Принципы унификации методов кодового управления множественным доступом к ресурсам вычислительных систем и ЛВС // Информационные технологии. 1998. № 2. С. 20-25.
26. Щеглов А. Ю. Метод синтеза расписаний обслуживания заявок для распределенных вычислительных систем и ЛВС реального времени // Информационные технологии. 1997. № 10. С. 22-27.
27. IP АТС Александрит [Электронный ресурс]: / СПб, НИИ Масштаб – 2016. - . – режим доступа: <http://mashtab.org/products/aleksandrit/>
28. РД 45.120-2000 Нормы технологического проектирования. Городские и сельские телефонные сети.
29. М.А. Шнепс, Численные методы теории телетрафика. - М. :Связь. – 1974. – 232 с.
30. М.А. Шнепс–Шнеппе, Системы распределения информации. Методы расчета. М. : Связь. 1979. – 344 с.
31. С.Н. Степанов Основы телетрафика мультисервисных сетей. М. «Экотрендз», 2010 г.
32. Н.А. Соколов Эволюция местных телефонных сетей. Пермь. «Книга», 1994 г.
33. Н.А. Соколов Задачи планирования сетей электросвязи. СПб. «Техника связи», 2012 г.
34. О.И. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения М. : Физматлит. – 2008. – 368 с.
35. Цыбаков, Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса / Б.С. Цыбаков. – М. : Радиотехника. - 1999. - №5. – С. 24 – 31.
36. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. М. : Мир. 1978. – 430 с.
37. Кучерявый, А.Е. Пакетная сеть связи общего пользования / А.Е. Кучерявый, Л.З. Гильченко, А.Ю. Иванов. - С.-Петербург: Наука и техника, 2004. – 272 с.
38. Кучерявый, А.Е. Сети связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый, А.Л. Цуприков. – М. : Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС), 2006. – 278 с.
39. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров Теория вероятностей. М. «Наука», 1969 г.
40. Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров Статистический анализ данных на компьютере. М.: «ИНФРА», 1998 г.
41. Н. Джонсон, Ф. Лион Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М. Мир.-1980.-610с.

42. Р. А. Фишер Статистические методы для исследователей. М. Гссвязиздат.1958.-267с.
43. Берлин, А.Н. Коммутация в системах и сетях связи / А.Н. Берлин – М. Экотрендз. – 2006.- 344с.
44. Парамонов, А.И. Проблемы развития инфокоммуникационных услуг и их влияние на перераспределение трафика / Парамонов А.И., Сенькина Н.С. // СПбГУТ. Информационные технологии и телекоммуникации.-2016. Т. 4. № 1.-С.46-54.
45. Парамонов, А.И. Модели потоков трафика для сетей М2М / Парамонов А.И. // М. Электросвязь. 2014.-№ 4.-С. 11-16.
46. Парамонов, А.И. Управление трафиком машина-машина на основе расписания / Парамонов А.И. // М. Системы управления и информационные технологии.-2014.-Т. 56.-№ 2.-С. 84-88.
47. Парамонов, А.И. Миграция речевого трафика в современных сетях связи / Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2007.-№ 12.-С.20-22.
48. Кучерявый, А.Е. Сети связи с малыми задержками / Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Аль-Наггар Я.М. //М. Электросвязь.-2013.-№ 12.-С.15-19.
49. Комашинский, В.И. От телекоммуникационной к когнитивной инфокоммуникационной системе / Комашинский В.И., Парамонов А.И. / В сборнике: 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления материалы конференции "информационные технологии в управлении" (ИТУ-2012). 2012. С. 787-793.
50. Комашинский, В.И. От телекоммуникационной к когнитивной инфокоммуникационной системе / Комашинский В.И., Мардер Н.С., Парамонов А.И. // Технологии и средства связи.-2011.-№ 4.-С.52.
51. Тарасов, Д.В. Особенности видеотрафика для сетей связи следующего поколения / Тарасов Д.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2010.-№ 2.-С.37-43.
52. Кучерявый, А.Е. Реструктуризация трафика сетей связи и новые подходы к прогнозированию их развития / Кучерявый А.Е., Ревелова З.Б., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2003.-№ 2.-С.9-12.
53. Киричек, Р.В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Кучерявый А.Е. // СПбГУТ Информационные технологии и телекоммуникации. 2014.-№ 4 (8).-С.29-41.

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ:**

[http://www.ifmo.ru/ru/viewdepartment/370/kafedra\\_vysokoproizvoditelnyh\\_telekommunikacionnyh\\_setey\\_bazovaya.htm](http://www.ifmo.ru/ru/viewdepartment/370/kafedra_vysokoproizvoditelnyh_telekommunikacionnyh_setey_bazovaya.htm)

**Кафедра высокопроизводительные телекоммуникационные сети (ВПТС)** является базовой кафедрой при АО «НИИ «Масштаб» и входит в состав факультета Компьютерных технологий и управления Университета ИТМО.

Кафедра ВПТС организована в соответствии с приказом ректора Университета ИТМО № 288-од от 15.05.2014г. во исполнение решения Учёного совета университета от 26.02.2014г. о том, что АО «НИИ «Масштаб» удовлетворяет критериям отбора высокотехнологичных компаний, претендующих на открытие базовой магистерской кафедры в Университете ИТМО.

Университет с участием специалистов АО «НИИ «Масштаб» осуществляет целевую подготовку аспирантов и магистров факультета компьютерных технологий и управления Университет ИТМО. В учебном процессе используются лаборатории университета и предприятия. Аспиранты и магистры приглашаются к участию в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполняемых АО «НИИ «Масштаб».

Цели создания БМК ВПТС:

- интеграция образования, науки и бизнеса по приоритетным направлениям развития технологических платформ Российской Федерации;
- создание инновационной среды для эффективной совместной (АО «НИИ «Масштаб» и Университет ИТМО) научно-педагогической деятельности;
- реализация сетевых образовательных магистерских и аспирантских программ, а также программ дополнительного профессионального образования по заказу бизнес-сообщества;
- целевая подготовка специалистов для дальнейшей работы на предприятии.

**Выпускники** кафедры обладают компетенциями:

- знаниями основ философии и методологии науки и методы научных исследований, методов проектирования распределенных информационных систем, их компонентов и протоколов их взаимодействия, знанием технических характеристик телекоммуникационных систем, нормативных требований по защите информации;
- умением: формулировать цели и задачи исследования, действовать в нестандартных ситуациях, проектировать системы с параллельной обработкой данных и высокопроизводительные системы и их компоненты, оценивать технические возможности и вырабатывать рекомендации по построению систем и сетей передачи, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы;
- владением: способностью к саморазвитию и самореализации, способностью к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию, методами постановки научных экспериментов, способностью проектировать телекоммуникационные системы и проводить анализ проектных решений по обеспечению безопасности телекоммуникационных систем, иностранным языком в научной и деловой сфере, способностью производить оценку технических характеристик телекоммуникационных систем.

Трудоустройство выпускников кафедры возможно на любых предприятиях, занимающиеся разработками в сфере телекоммуникаций.

Студенты могут проходить практику в компаниях, занимающихся разработками в сфере телекоммуникаций, в Санкт-Петербурге (в частности, в АО «НИИ «Масштаб») и зарубежных вузах.

**Мы готовим квалифицированных магистров в области инфокоммуникационных технологий с новыми знаниями, образом мышления и способностями быстрой адаптации к современным условиям труда.**

Давыдов Александр Евгеньевич,  
Смирнов Павел Игоревич,  
Парамонов Александр Иванович

## **Проектирование телекоммуникационных систем и сетей**

### **Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров сетей связи и анализ трафика**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49