

## Задание на курсовой проект

Для IP-сети, представленной на рис. 1, оценить возможность использования IP-телефонии: оценить среднюю задержку голосовых пакетов. Сравнить данную характеристику для двух механизмов поддержания качества обслуживания: кодека и сжатия заголовка (CRTP), алгоритм обслуживания очереди FIFO или кодека и сжатия заголовка (CRTP)PQ.

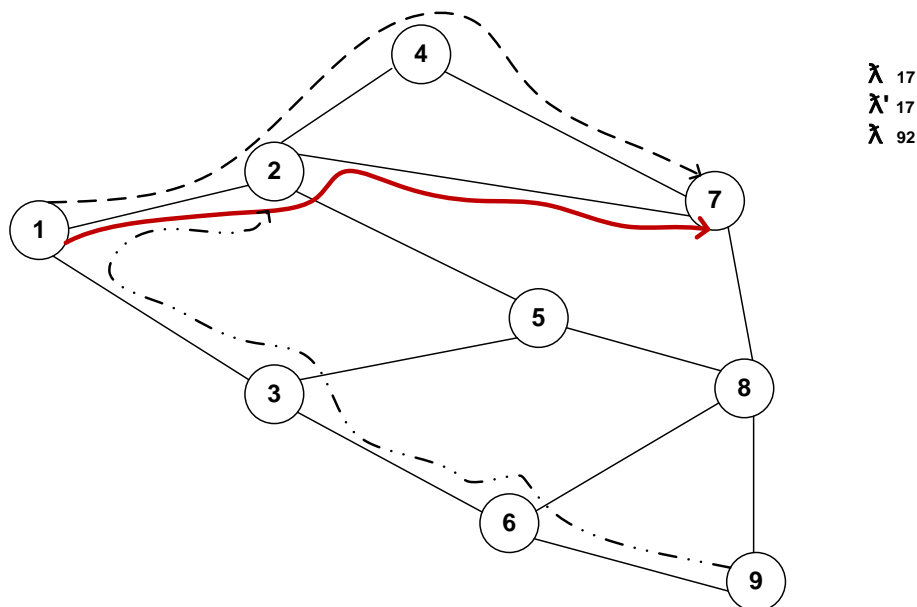


Рис. 1. Исходная IP-сеть

За исходные данные примем следующие числа:

- 1) длины линий  $S=1500$ , км;
- 2) скорость распространения сигнала в среде передачи  $V=150000$ , км/с;
- 3) длины пакетов распределены экспоненциально, средняя длина информационного пакета  $L=2048$ , бит;
- 4) допустимый размер очереди на передачу  $N=12$ , пак.;
- 5) пропускные способности линий  $B=56$ , Кбит/с;
- 6) интенсивности имеющихся сеансов  $\lambda$ , пак./мин.  
 -для передачи данных:  $\lambda_{1,7}=600$ ,  $\lambda_{9,2}=100$   
 -для передачи речи:  $\lambda'_{1,7}=400$ ;
- 7) вероятность ошибки в разряде —  $p_b=10^{-6}$ ;
- 8) тип кодека – G.728;
- 9) число кадров кодека в голосовом пакете  $k=4$ ;

10) Длина кадра кодека,  $L_k = 80$ , бит;

### **Качество обслуживания**

Под качеством обслуживания (Quality of Service, QoS) в общем случае принято понимать предоставление пользователям и приложениям в сети предсказуемого сервиса по доставке данных. Конкретное же определение и параметры качества обслуживания главным образом определяются типом приложения. Так, например, для передачи голосового трафика, важнейшими параметрами QoS являются задержка и вариация задержки на определенном интервале времени, в то время как потеря некоторой части пакетов допустима. Параметры качества обслуживания можно разбить на три группы:

- параметры пропускной способности (минимальная, средняя и максимальная скорость передачи)
- параметры задержек передачи пакетов (средние и максимальные величины задержек и вариаций задержек)
- параметры надежности передачи (уровень потерь и искажений пакетов)

Измерение указанных параметров производится на определенном интервале времени. Чем меньше этот временной интервал, тем более жесткие требования предъявляются к сети, а следовательно ко всем ее элементам, поскольку обеспечение QoS “из конца в конец” требует взаимодействия всех узлов на пути трафика и определяется надежностью, функциональностью и производительностью самого “слабого звена”. Например, очевидно, что невозможно гарантировать обеспечение приоритетной обработки VLAN в распределенной коммутируемой сети Ethernet, если по маршруту распространения данных установлен хотя бы один концентратор (hub Ethernet).

Между клиентом, потребителем услуг транспортной сети, и провайдером данных услуг может быть заключено “соглашение об уровне обслуживания” (Service Level Agreement, SLA), в котором определяются:

- плата за обслуживание в зависимости от выбранного уровня обслуживания

- параметры QoS для данного уровня (максимальная задержка и вариации, пропускная способность, максимальное время восстановления сети после аварий и т. д.)

- методы измерений вышеуказанных параметров
- штрафные санкции за не обеспечение требуемого QoS
- любые другие дополнительные статьи по обоюдному согласию

Для предоставления различным пользователям индивидуального качества обслуживания требуется реализовывать в сети различные механизмы управления QoS. Для IP-сетей это, например, RSVP и DiffServ, поддерживающие, соответственно, качество обслуживания для микро-потоков приложений и агрегированных потоков.

### **Модель службы QoS**

На рисунке 1.1 представлена базовая архитектура службы QoS с элементами трех основных типов:

- средств QoS узла;
- протоколов сигнализации QoS;
- централизованных функций политики, управления и учета QoS.

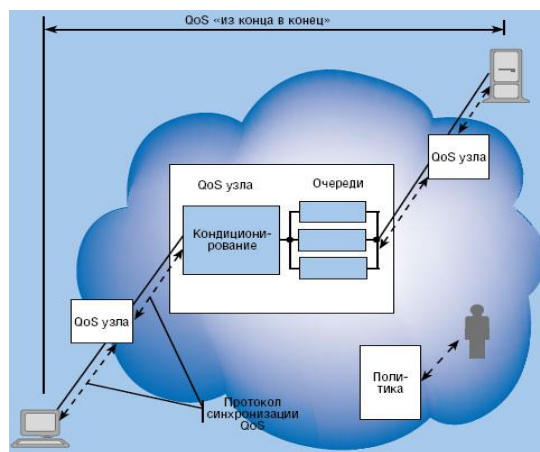


Рис. 1.1 Архитектура службы QoS

Средства QoS узла - основной исполнительный механизм службы QoS, так как именно они непосредственно влияют на процесс продвижения пакетов между входными и выходными интерфейсами коммутаторов и маршрутизаторов и, следовательно, определяют вклад данного устройства в характеристики качества обслуживания сети.

Средства QoS узла в свою очередь могут включать компоненты двух типов:

- механизмы обслуживания очередей;
- механизмы кондиционирования трафика.

Механизмы обслуживания очередей являются необходимым элементом любого устройства, работающего по принципу коммутации пакетов. Когда скорость поступления трафика становится больше скорости его продвижения, возникают очереди. Как раз в такие периоды и нужны механизмы обслуживания очередей: варьируя выборкой пакетов, они влияют на время их нахождения в очереди, а значит, и на величину задержки - один из важнейших параметров качества обслуживания. По умолчанию в сетевых устройствах очереди обслуживаются по простейшему алгоритму FIFO ("первым пришел - первым обслужен"), что достаточно только для реализации сервиса "по мере возможности", для поддержки же "истинных"

сервисов QoS нужны более сложные механизмы, обрабатывающие несколько классов потоков, например алгоритмы приоритетного или взвешенного обслуживания.

Механизмы кондиционирования трафика решают задачу создания условий для качественного обслуживания трафика другим способом - не за счет выбора оптимального алгоритма обслуживания очереди, а за счет ее сокращения. При этом сокращение очереди достигается путем воздействия на входной трафик: например, снижения скорости поступления потока в данный узел, уменьшения его неравномерности и т. п.

Механизм кондиционирования трафика обычно включает выполнение следующих функций:

1. Классификация трафика выделяет из общей последовательности пакетов, поступающих в устройство, пакеты одного потока с общими требованиями к качеству обслуживания. Классификация может выполняться на основе различных формальных признаков пакета - адресов источника и назначения, значений портов TCP/UDP, значения приоритета, значения метки потока (в версии IPv6).

2. Профилирование трафика на основе правил (policing) подразумевает проверку соответствия каждого входного потока параметрам его профиля. В случае нарушения параметров профиля (в частности, при превышении длительности посылки или средней скорости) происходит отбрасывание или маркировка пакетов этого потока. Отбрасывание нечастых пакетов снижает интенсивность потока и приводит его параметры в соответствие с указанными в профиле. Маркировка пакетов без отбрасывания нужна для того, чтобы они все же были обслужены данным узлом (или последующими по потоку), пусть и с более низким качеством (например, с увеличенным значением задержки). Для проверки соответствия входного трафика заданному профилю механизм кондиционирования выполняет измерение параметров потока. Для этого обычно используется один из известных

алгоритмов, например алгоритм "дырявого ведра" (leaky bucket) или более гибкий алгоритм GCRA.

3. Формирование трафика (shaping) предназначено для придания прошедшему профилирование трафику нужного распределения по времени. С помощью данной функции стремятся сгладить пульсации трафика, чтобы поток пакетов на выходе из устройства был более равномерным, чем на входе. Сглаживание пульсаций уменьшает очереди в сетевых устройствах, которые будут обрабатывать трафик далее по потоку. Формирование трафика целесообразно и для восстановления временных соотношений трафика приложений, работающих с равномерными потоками, например голосовых приложений.

Механизмы кондиционирования трафика могут быть реализованы в каждом узле сети либо только в пограничных устройствах. Последний вариант часто используют провайдеры при кондиционировании трафика своих клиентов.

Протоколы сигнализации QoS нужны для того, чтобы механизмы QoS отдельных узлах могли обмениваться служебной информацией для координации усилий по обеспечению параметров качества обслуживания на всем пути следования потока, т. е. "из конца в конец". Например, с помощью средств сигнализации приложение может зарезервировать себе вдоль всего маршрута следования требуемую среднюю пропускную способность (для сетей IP эту функцию поддерживает протокол RSVP).

Одно из примитивных средств сигнализации - маркировка пакета признаком с информацией о требуемом для него качестве обслуживания. Наиболее часто для этого используется поле приоритета (в пакете IPv4 - первые три бита поля Type Of Service, TOS). Перемещаясь от устройства к устройству, пакет переносит вдоль пути следования свои требования к качеству обслуживания, правда, в достаточно обобщенной форме - так как

поле приоритета имеет всего несколько возможных значений, то и качество обслуживания будет предоставляться дифференцированно по нескольким агрегированным потокам сети.

Инициировать работу протокола сигнализации может не только конечный узел, но и промежуточное устройство. Например, пограничный маршрутизатор в сети провайдера способен выполнить классификацию трафика и зарезервировать данному потоку клиента некоторую пропускную способность. В этом случае координация сетевых устройств будет происходить не на всем пути следования трафика, а только в пределах сети данного провайдера, что, конечно, снижает качество обслуживания трафика.

Централизованные функции политики, управления и учета QoS не обязательно присутствуют в архитектуре службы QoS, но они очень желательны в крупных сетях. Каждый пользователь и каждое приложение стремятся получить обслуживание с максимально высоким уровнем качества (например, пропускной способности). Следовательно, необходимы средства, с помощью которых администратор мог бы задавать рациональный уровень качества обслуживания для отдельных пользователей и приложений или для их групп. Функции политики позволяют администратору создавать правила, по которым сетевые устройства могут формально, на основании набора признаков, распознавать отдельные типы трафика и применять к ним определенные возможности QoS.

## Определение длины голосовых и информационных пакетов

Длина пакета будет равна:

$$L_{\Gamma} = k \cdot L_k + L_3, \quad (6.1)$$

где  $k = 4$  – число кадров кодера в пакете,

$L_k = 80$  бит – длина кадра кодека,

$L_3$  – длина заголовка пакета.

Если не используется механизм сжатия заголовков (CRTP), то

$$L_3 = L_{RTP} + L_{UDP} + L_{IP} + L_2, \quad (6.2)$$

где  $L_{RTP}$  – длина заголовка протокола RTP (12 байт),

$L_{UDP}$  – длина заголовка протокола UDP (8 байт),

$L_{IP}$  – длина заголовка IP (20 байт),

$L_2$  – длина заголовка протокола второго уровня. Для протокола второго уровня PPP длина заголовка равна 7 байт.

Если используется механизм сжатия заголовков (CRTP), то  $L_3 = 11$  байт = 88 бит.

$$L_3 = \begin{cases} L_{RTP} + L_{UDP} + L_{IP} + L_2, \\ 4 + L_2 \end{cases}, \quad (6.3)$$

Длина заголовка пакета без использования механизма сжатия заголовков (CRTP)  $L_3 = 47$  байт = 376 бит.

Длина заголовка пакета с использованием механизма сжатия заголовков CRTP  $L_3 = 11$  байт = 88 бит.

Длина голосового пакета без использования CRTP:

$$L_2 = 4 * 80 + 376 = 856 \text{ бит.}$$

Длина голосового пакета с использованием CRTP:

$$L_2 = 4 * 80 + 88 = 568 \text{ бит.}$$



Если фрагментация не применяется, то длина информационного пакета составляет:  $L_u = 20000$ , бит

Если применяется фрагментация информационных пакетов, то длина информационного пакета определяется из условия:

$$L_u/B \leq 10 \text{ мс}, \quad (6.4)$$

т.е. время передачи информационного пакета не должно превышать 10 мс, кроме того, длина IP-пакета должна быть кратна 56.

$$L_u \leq 10 \text{ мс} * B = 10 * 10^{-3} * 56 * 10^{-3} = 560 \text{ бит}.$$

Оценим протокольную избыточность для информационных сеансов:

$$\Pi_u = L_3 / L_u * 100\% \quad (6.5)$$

1. Фрагментация не используется

$$\Pi_u = L_3 / L_u * 100\% = (376 / 2000) * 100\% = 18,8\%$$

2. Фрагментация используется

$$\Pi_u = L_3 / L_u * 100\% = (376 / 560) * 100\% = 67,1\%$$

## **Механизм поддержки качества обслуживания: Кодек, CRTP, фрагментация, FIFO**

Механизм аппроксимируется системой M/D/1/∞ с дисциплиной FIFO.

### **Оценка средней задержки пакета**

Обслуживание производится по принципу FIFO (first in – first out), используется механизм сжатия заголовка CRTP и фрагментация информационных пакетов. Линия обслуживает комбинированную нагрузку: информационные пакеты со средней длиной  $L_u = 560$  бит и голосовые пакеты со средней длиной  $L_v = 568$  бит.

Интенсивность обслуживания пакетов в узлах:

$$\mu_i = \frac{B}{L_v} \text{ (пак/с)} \quad (6.6)$$

Интенсивность обслуживания голосовых пакетов в узлах:

$$\mu_1 = \frac{B}{L_v} = \frac{56000}{568} = 98,6 \text{ (пак/с)}$$

Интенсивность обслуживания информационных пакетов в узлах:

$$\mu_2 = \frac{B}{L_u} = \frac{56000}{560} = 100 \text{ (пак/с)}$$

Время подачи пакета равно:

$$\overline{X_i} = \frac{1}{\mu_i} \text{ (с)} \quad (6.7)$$

Время подачи голосового пакета равно:

$$\overline{X_1} = \frac{1}{\mu_1} = \frac{1}{98,6} = 0,0101 \text{ (с)}$$

Время подачи информационного пакета равно:

$$\overline{X_2} = \frac{1}{\mu_2} = \frac{1}{100} = 0,0100 \text{ (с)}$$

Второй момент времени передачи голосового пакета при детерминированном распределении длины пакета равен:

$$\overline{X_1^2} = \frac{1}{\mu_1^2} = 1,02 \cdot 10^{-4} (c^2)$$

Второй момент времени передачи информационного пакета при детерминированном распределении длины пакета равен:

$$\overline{X_2^2} = \frac{1}{\mu_2^2} = 1,00 \cdot 10^{-4} (c^2)$$

Задержка распространения сигнала в линии равна:

$$\tau = \frac{S}{V} = \frac{2000}{250000} = 8,00 \cdot 10^{-3} (c)$$

Задержка голосового пакета сеанса в очереди на передачу по линии равна:

$$W = \frac{\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^2}}{2 \cdot (1 - \rho)} (c) \quad (6.8)$$

Задержка голосового пакета сеанса (1,7) в очереди на передачу по линии (1,2) равна:

$$W_{1,2} = \frac{\lambda'_{1,7} \cdot \overline{X_1^2} + (\lambda_{1,7} \cdot \overline{X_2^2} + \lambda_{9,2} \cdot \overline{X_2^2})}{2 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,7}}{\mu_1} + (\frac{\lambda_{1,7}}{\mu_2} + \frac{\lambda_{9,2}}{\mu_2})))} = 6,67 \cdot 10^{-4} (c)$$

Задержка голосового пакета сеанса (3,7) в очереди на передачу по линии (2,7) равна:

$$W_{2,7} = \frac{\lambda'_{2,7} \cdot \overline{X_1^2}}{2 \cdot (1 - \frac{\lambda'_{2,7}}{\mu_1})} = 6,67 \cdot 10^{-4} (c)$$

Средняя задержка пакета в потоке сеанса, идущем по пути  $p$ , равна:

$$T_c = \sum_{\text{сеанса}} (W + \frac{1}{\mu_1} + \tau) (c) \quad (6.9)$$

Средняя задержка голосового пакета в потоке сеанса (1,7) равна:

$$T_c = \sum_{\text{сессия}} (W + \frac{1}{\mu_1} + \tau) = W_{1,2} + W_{2,7} + W_{7,8} + 3 \cdot (\frac{1}{\mu_1} + \tau) = 0,0563 \text{ (с)}$$

Задержка в шлюзах равна:

$$T_{ш} = T_H + T_k + T_{\Pi} \quad (6.10)$$

где  $T_H = 0,010$  с – задержка накопления, сек; вызвана необходимостью подготовки кадра из последовательных речевых отсчетов.

$T_k = 0,005$  с – задержка кодирования, сек; вызвана необходимостью предварительного анализа отсчетов.

$T_{\Pi}$  – задержка формирования пакетов, сек; вызвана процессом подготовки голосовых пакетов как информационных единиц. В одном пакете может быть собрано несколько кадров кодека.

$T_{\Pi} = k \cdot T_H + T_3$ , где  $k=6$  – число кадров в пакете,

$T_3$  – длительность заголовка пакета, сек.

$$T_3 = L_3 / B_k, \quad (6.11)$$

Где  $L_3 = 88$  бит – размер заголовка пакета,

$B_k = 8000$  бит/с – скорость передачи.

Тогда длина заголовка пакета:

$$T_3 = L_3 / B_k = 88 / 8000 = 0,011 \text{ (с)}$$

Задержка формирования пакетов  $T_{\Pi}$  будет равна:

$$T_{\Pi} = k \cdot T_H + T_3 = 6 \cdot 0,01 + 0,011 = 0,071 \text{ (с)}$$

Таким образом,

$$T_{ш} = T_H + T_k + T_{\Pi} = 0,01 + 0,005 + 0,071 = 0,086 \text{ (с)}$$

Задержка голосового пакета равна

$$T = T_{ш} + T_c, \quad (6.12)$$

Где  $T_{ш} = 0,086$  с – задержка в шлюзах,

$T_c = 0,0563$  с – задержка в сети,

$$T = T_{III} + T_c = 0,086 + 0,0563 = 0,1423 \text{ (с)}$$

### Оценка вариации задержки пакета

Будем полагать, что времена ожидания пакетов в узлах являются независимыми случайными величинами, имеющие моменты первого и второго порядков.

Второй момент времени передачи голосового пакета,  $c^2: \overline{X_1^2} = 1,02 \cdot 10^{-4}$

Второй момент времени передачи информационного пакета,  $c^2: \overline{X_2^2} = 1,00 \cdot 10^{-4}$

Третий момент времени передачи голосового пакета,  $c^3: \overline{X_1^3} = 1,03 \cdot 10^{-6}$

Третий момент времени передачи информационного пакета,  $c^3: \overline{X_2^3} = 1,00 \cdot 10^{-6}$

Дисперсия времени ожидания пакета в очереди на передачу по линии равна:

$$\sigma^2(W) = \frac{\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^3}}{3 \cdot (1 - \rho)} - \frac{(\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^2})^2}{2 \cdot (1 - \rho)^2} \quad (6.13)$$

Дисперсия времени ожидания голосового пакета сеанса (1,7) в очереди на передачу по линии (1,2) равна:

$$\sigma^2(W_{1,3}) = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^3} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^3}}{3 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} - \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2})^2}{2 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} = 6,716 \cdot 10^{-4}$$

Дисперсия времени ожидания голосового пакета сеанса (1,3) в очереди на передачу по линии (2,7) равна:

$$\sigma^2(W_{3,7}) = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^3} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^3}}{3 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} - \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2})^2}{2 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} = 6,716 \cdot 10^{-4}$$

Дисперсия времени ожидания голосового пакета сеанса (1,3) в очереди на передачу по линии (1,8) равна:

$$\sigma^2(W_{7,8}) = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^3} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^3}}{3 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} - \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2})^2}{2 \cdot (1 - (\frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1} + \frac{\lambda_{1,8}}{\mu_2}))} = 6,716 \cdot 10^{-4}$$

Вариация задержки пакета в потоке сеанса, идущем по пути  $p$ , равна:

$$\nu_p = \sqrt{\sum_{(i,j) \in p} \sigma^2(W_{i,j})} \quad (6.14)$$

В потоке сеанса (1,8):

$$(c) \quad \nu_{1,8} = \sqrt{\sigma^2(W_{1,3}) + \sigma^2(W_{3,7}) + \sigma^2(W_{7,8})} = 0,045$$

## **Механизм поддержки качества обслуживания: Кодек, CRTP, фрагментация, PQ**

Механизм аппроксимируется системой M/D/1/∞ с дисциплиной PQ.

### **6.3.1 Оценка средней задержки пакета**

Обслуживание производится по принципу PQ, используется механизм сжатия заголовка CRTP и фрагментация информационных пакетов. Линия обслуживает комбинированную нагрузку: голосовые пакеты приоритета 1 со средней длиной  $L_c = 568$  бит и информационные пакеты приоритета 2 со средней длиной  $L_u = 560$  бит.

Интенсивность обслуживания голосовых пакетов в узлах:

$$\mu_1 = \frac{B}{L_c} = \frac{56000}{568} = 98,6 \text{ (пак/с)}$$

Интенсивность обслуживания информационных пакетов в узлах:

$$\mu_2 = \frac{B}{L_u} = \frac{56000}{560} = 100 \text{ (пак/с)}$$

Время подачи голосового пакета равно:

$$\overline{X_1} = \frac{1}{\mu_1} = \frac{1}{98,6} = 0,0101 \text{ (с)}$$

Время подачи информационного пакета равно:

$$\overline{X_2} = \frac{1}{\mu_2} = \frac{1}{100} = 0,0100 \text{ (с)}$$

Второй момент времени передачи голосового пакета при детерминированном распределении длины пакета равен:

$$\overline{X_1^2} = \frac{1}{\mu_1^2} = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ (с}^2\text{)}$$

Второй момент времени передачи информационного пакета при детерминированном распределении длины пакета равен:

$$\overline{X_2^2} = \frac{1}{\mu_2^2} = 1,00 \cdot 10^{-4} (c^2)$$

Задержка распространения сигнала в линии равна:

$$\tau = \frac{S}{V} = \frac{2000}{250000} = 8,00 \cdot 10^{-3} (c)$$

Задержка голосового пакета приоритета 1 сеанса (1,3) в очереди на передачу в системе PQ по линии (1,8) равна:

$$W_{1,3} = \frac{\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^2}}{2 \cdot (1 - \rho_1)} = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2}}{2 \cdot (1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} = 6,29 \cdot 10^{-4} (c)$$

Задержка голосового пакета сеанса (3,7) в очереди на передачу по линии (1,8) равна:

$$W_{3,7} = \frac{\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^2}}{2 \cdot (1 - \rho_1)} = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2}}{2 \cdot (1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} = 6,29 \cdot 10^{-4} (c)$$

Задержка голосового пакета сеанса (7,8) в очереди на передачу по линии (1,8) равна:

$$W_{7,8} = \frac{\sum_m \lambda_m \cdot \overline{X_m^2}}{2 \cdot (1 - \rho_1)} = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X_1^2} + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X_2^2}}{2 \cdot (1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} = 6,29 \cdot 10^{-4} (c)$$

Средняя задержка голосового пакета в потоке сеанса (1,8) равна:

$$T_c = \sum_{\text{сеанса}} (W + \frac{1}{\mu_1} + \tau) = W_{1,3} + W_{3,7} + W_{7,8} + 3 \cdot (\frac{1}{\mu_1} + \tau) = 0,02 (c)$$

Задержка в шлюзах остается такой же, как и в п. 6.2.1

$$T_{ш} = T_H + T_k + T_{п} = 0,01 + 0,005 + 0,071 = 0,086 (c)$$



Задержка голосового пакета равна

$$T = T_{ш} + T_c,$$

Где  $T_{ш}=0,086$  с – задержка в шлюзах,

$T_c=0,02$  с – задержка в сети,

$$T = T_{ш} + T_c = 0,086 + 0,02 = 0,106 \text{ (с)}$$

### Оценка вариации задержки пакета

Дисперсия времени ожидания голосового пакета сеанса Р в очереди на передачу по линии (i,j) равна:

$$\sigma^2(W_{i,j}) = \overline{W_{i,j}^2} - (\overline{W_{i,j}})^2, \text{ где}$$

$\overline{W_{i,j}}$  - первый момент времени ожидания (средняя задержка ожидания) в очереди пакета k- приоритета,

$\overline{W_{i,j}^2}$  - второй момент времени ожидания в очереди пакета k- приоритета.

$\overline{W_{i,j}^2}$  определяется из формулы: (6.16)

$$\frac{G_n}{3 \cdot (1 - R_{k-1})^2 \cdot (1 - R_k)} + \frac{M_n \cdot M_k}{2 \cdot (1 - R_{k-1})^2 \cdot (1 - R_k)^2} + \frac{M_n \cdot M_{k-1}}{2 \cdot (1 - R_{k-1})^3 \cdot (1 - R_k)}$$

Где  $M_k = \sum_{j=1}^k \lambda_j \cdot \overline{X_j^2}$ ,

$R_k = \sum_{i=1}^k \rho_j, \rho_j = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ ,

$G_k = \sum_{i=1}^k \lambda_j \cdot \overline{X_j^3}$ ,

n=2 – число приоритетов.

Так как голосовые пакеты обладают 1-приоритетом (k=1), формула примет вид:

$$\overline{W_1^2} = \frac{G_2}{3 \cdot (1 - R_1)} + \frac{M_2 \cdot M_1}{2 \cdot (1 - R_1)^2},$$

Где  $G_2 = \sum_{j=1}^2 \lambda_j \cdot \bar{X}_j^3 = \lambda_1 \cdot \bar{X}_1^3 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^3$ ,

$$R_1 = \rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}, M_2 = \sum_{j=1}^2 \lambda_j \cdot \bar{X}_j^2 = \lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^2, M_1 = \lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2$$

Считаем, что при  $k=1$ ,  $R_{k-1} = 0$  и  $M_{k-1} = 0$

Таким образом, второй момент ожидания в очереди 1-приоритета (голос) определяется по формуле:

$$\bar{W}_1^2 = \frac{\lambda_1 \cdot \bar{X}_1^3 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^3}{3(1 - \rho_1)} + \frac{(\lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^2) \cdot \lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2}{2(1 - \rho_1)^2}$$

Второй момент времени передачи голосового пакета,  $c^2: \bar{X}_1^2 = 1,02 \cdot 10^{-4}$

Второй момент времени передачи информационного пакета,  $c^2: \bar{X}_2^2 = 1,00 \cdot 10^{-4}$

Третий момент времени передачи голосового пакета,  $c^3: \bar{X}_1^3 = 1,03 \cdot 10^{-6}$

Третий момент времени передачи информационного пакета,  $c^3: \bar{X}_2^3 = 1,00 \cdot 10^{-6}$

Определим второй момент времени ожидания в очереди на передачу по линии (1,3) голосового пакета (1-приоритет) сеанса (1,8):

$$\begin{aligned} \bar{W}_{1,3}^2 &= \frac{\lambda_1 \cdot \bar{X}_1^3 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^3}{3(1 - \rho_1)} + \frac{(\lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \cdot \bar{X}_2^2) \cdot \lambda_1 \cdot \bar{X}_1^2}{2(1 - \rho_1)^2} = \\ &= \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^3 + \lambda_{1,8} \cdot \bar{X}_2^3}{3(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} + \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^2 + \lambda_{1,8} \cdot \bar{X}_2^2) \cdot \lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^2}{2(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})^2} = 4,564 \cdot 10^{-6} \text{ (с}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\bar{W}_{1,3} = 6,29 \cdot 10^{-4} \text{ (с)} \text{ (рассчитана выше)}$$

Тогда

$$\sigma^2(W_{1,3}) = \bar{W}_{1,3}^2 - (\bar{W}_{1,3})^2 = 4,168 \cdot 10^{-6}, \text{ (с}^2\text{)}$$

Определим второй момент времени ожидания в очереди на передачу по линии (3,7) голосового пакета (1-приоритет) сеанса (1,8):

$$\bar{W}_{3,7}^2 = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^3 + \lambda_{1,8} \cdot \bar{X}_2^3}{3(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} + \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^2 + \lambda_{1,8} \cdot \bar{X}_2^2) \cdot \lambda'_{1,8} \cdot \bar{X}_1^2}{2(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})^2} = 4,564 \cdot 10^{-6} \text{ (с}^2\text{)}$$

$$\overline{W_{3,7}} = 6,29 \cdot 10^{-4} \text{ (с) (рассчитана выше)}$$

Тогда

$$\sigma^2(W_{3,7}) = \overline{W_{3,7}^2} - (\overline{W_{3,7}})^2 = 4,168 \cdot 10^{-6}, \text{ (с}^2\text{)}$$

Определим второй момент времени ожидания в очереди на передачу по линии (7,8) голосового пакета (1-приоритет) сеанса (1,8):

$$\overline{W_{7,8}^2} = \frac{\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X}_1^3 + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X}_2^3}{3(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})} + \frac{(\lambda'_{1,8} \cdot \overline{X}_1^2 + \lambda_{1,8} \cdot \overline{X}_2^2) \cdot \lambda'_{1,8} \cdot \overline{X}_1^2}{2(1 - \frac{\lambda'_{1,8}}{\mu_1})^2} = 4,564 \cdot 10^{-6} \text{ (с}^2\text{)}$$

$$\overline{W_{7,8}} = 6,29 \cdot 10^{-4} \text{ (с) (рассчитана выше)}$$

Тогда

$$\sigma^2(W_{7,8}) = \overline{W_{7,8}^2} - (\overline{W_{7,8}})^2 = 4,168 \cdot 10^{-6}, \text{ (с}^2\text{)}$$

Вариация задержки голосового пакета в потоке сеанса (1,8) равна:

$$\nu_p = \sqrt{\sum_{(i,j) \in p} \sigma^2(W_{i,j})}$$

$$\nu_{1,8} = \sqrt{\sigma^2(W_{1,3}) + \sigma^2(W_{3,7}) + \sigma^2(W_{7,8})} = 3,563 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}$$