

# МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УЗЛОВ КОММУТАЦИИ ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

А. Н. Соколов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. М. А. Бонч-Бруевича, 191186, Санкт-Петербург, Россия

УДК 621.394.343

Предложен метод оценки производительности коммутационных узлов, предназначенных для сетей связи следующего поколения. Метод основан на расчете вероятностно-временных характеристик, определяемых нормами, которые приведены в рекомендациях Международного союза электросвязи. Для сетей связи следующего поколения такие нормы заданы средним значением времени задержки пакетов и квантилем одноименной функции распределения.

**Ключевые слова:** узел коммутации, производительность, задержка, квантиль, функция распределения.

In clause, the evaluation method of the packet switching node throughput in next generation networks is proposed. Method is based on the calculation of probabilistic characteristics defined by the indices given in the International Telecommunication Union recommendations. For the next generation networks these indices specified as mean value and quantile of packet delay time.

**Key words:** switching node, throughput, delay, quantile, distribution function.

**Постановка задачи.** Производительность узлов коммутации  $C$ , используемых в сетях связи следующего поколения, определяется количеством IP-пакетов, которое обрабатывается в единицу времени (обычно за 1 с). Производители телекоммуникационного оборудования разрабатывают узлы коммутации нескольких типов, которые различаются номиналами производительности, образующими ряд  $C_1, C_2, \dots, C_L$ .

Номинал производительности для узла коммутации  $k$ -го типа ( $C_k, k = \overline{1, L}$ ) должен быть выбран как минимальное значение из всех возможных значений ряда  $C_1, C_2, \dots, C_L$ , удовлетворяющее условию  $C_k \geq \mu$ , где  $\mu$  – интенсивность обслуживания IP-пакетов, вычисленная с учетом заданных показателей качества обслуживания в сети связи следующего поколения.

Для оценки интенсивности обслуживания IP-пакетов анализируются два показателя, приведенные в рекомендации Y.1541 [1] Международного союза электросвязи (МСЭ). Во-первых, определяется норма на IPTD (IP packet transfer delay) – среднее время задержки IP-пакетов при их передаче между интерфейсами пользователь – сеть. Во-вторых, задается значение IPDV (IP packet delay variation), которое определяет вариацию времени задержки IP-пакетов. Для расчета этого параметра из 0,999-го квантиля функции распределения (ФР) времени задержки IP-пакетов  $t_P$  вычитается величина минимально возможной длительности передачи IP-пакетов  $t_{\min}$  [1]:

$$\text{IPDV} = t_P - t_{\min}.$$

Норма на IPTD позволяет оценить минимальную величину  $\mu_{\text{IPTD}}$ , т. е. интенсивность обслуживания, необходимую для того, чтобы средняя задержка IP-пакетов не превышала заданного порога. Аналогично норма на IPDV позволяет найти такое минимальное значение  $\mu_{\text{IPDV}}$ , при котором величина вариации задержки IP-пакетов соответствует заданным требованиям. Зная эти две величины, можно найти интенсивность  $\mu$ :

$$\mu = \max\{\mu_{\text{IPTD}}, \mu_{\text{IPDV}}\}.$$

Таким образом, поставленная задача сводится к оценке величин  $\mu_{\text{IPTD}}$  и  $\mu_{\text{IPDV}}$ . Для решения этой задачи целесообразно использовать математический аппарат теории телетрафика [2]. Узел коммутации рассматривается в качестве системы массового обслуживания (СМО), поступающие IP-пакеты представляют собой поток заявок.

**Оценка величины  $\mu_{\text{IPTD}}$ .** В [3] получены выражения для расчета кумулянтов  $n$ -го порядка времени ожидания начала обслуживания IP-пакетов в узле коммутации  $W_n^C$ . Кумулянт первого порядка  $W_1^C$  равен среднему значению времени ожидания. Время обработки IP-пакетов  $B$  может считаться постоянной величиной. Обычно тракт обмена IP-пакетами между интерфейсами пользователь – сеть состоит из  $N$  узлов коммутации. В каждом  $i$ -м узле коммутации для средних значений времени ожидания и обслуживания следует использовать обозначения с индексом  $i$ . Все IP-пакеты, в дополнение ко времени пребывания в узлах коммутации, задерживаются на постоянное время  $T_N$ , определяемое в основном длительностью распространения сигнала. Значение IPTD определяется суммой

$$\text{IPTD} = T_N + \sum_{i=1}^N W_1^C(i) + \sum_{i=1}^N B(i). \quad (1)$$

Величины  $W_n^C(i)$  определяются на основе двух распределений:  $A_i(t)$  и  $B_i(t)$ . Функция  $A_i(t)$  описывает распределение длительности интервалов между моментами поступлений соседних заявок для  $i$ -го узла коммутации. Функция  $B_i(t)$  представляет собой распределение времени обслуживания в  $i$ -м узле коммутации. Для анализа  $i$ -го узла коммутации достаточно использовать время обслуживания, которое связано с величиной  $\mu_{\text{IPTD}}(i)$  простым соотношением [2]

$$B(i) = \frac{1}{\mu_{\text{IPTD}}(i)}.$$

Для получения оценки  $\mu_{\text{IPTD}}$  целесообразно предположить, что параметры трафика для всех узлов коммутации идентичны. Тогда выражение (1) можно упростить:

$$\text{IPTD} = T_N + NW_1^C(A(t), \mu_{\text{IPTD}}) + \frac{N}{\mu_{\text{IPTD}}}. \quad (2)$$

Вид и параметры функции  $A(t)$  определяются по результатам измерений обслуживаемого трафика, значение  $T_N$  выбирается для максимальной длины устанавливаемого соединения, а величина IPTD задана нормами МСЭ. Таким образом, в выражении (2) неизвестной величиной является только  $\mu_{\text{IPTD}}$ . Искомая величина находится численно из соотношения (2). Выражение для функции  $W_1^C(A(t), \mu_{\text{IPTD}})$  в формуле (2) приведено в работе [3].

**Оценка величины  $\mu_{\text{IPDV}}$ .** В рекомендации МСЭ Y.1541 [1] приведена методика оценки 0,999-го квантиля ФР времени задержки IP-пакетов. Данная методика позволяет рассчитать значение  $t_P$ , входящее в формулу для вычисления показателя IPDV. Оценка величины

$t_{\min}$  выполняется с учетом постоянных задержек, детерминированных для сетей с известной структурой, и представляет собой достаточно простую последовательность арифметических действий. Вычисление квантиля  $t_P$ , наоборот, является сложной задачей.

Следует отметить, что в [1] не приводится оценка точности предложенного метода. Поэтому до разработки принципов расчета величины  $\mu_{IPDV}$  следует оценить погрешность, которая возникает при вычислении квантиля с помощью метода, рекомендованного МСЭ. При использовании данного метода предварительно оцениваются среднее значение  $\bar{t}_S(i)$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_S(i)$  времени задержки заявок на каждой  $i$ -й фазе обслуживания, т. е. в каждом узле коммутации. Кроме того, в результате измерений для  $i$ -й фазы получено значение квантиля  $t_P(i)$ . В [1] значение  $p$ , для которого нормирован квантиль, равно 0,999. Помимо указанных параметров определяется значение  $x_P$ , представляющее собой значение  $p$ -квантиля для стандартного нормального распределения [4].

Далее вычисляется асимметрия времени задержки заявок на  $i$ -й фазе обслуживания  $\gamma(i)$ . Формулу для расчета асимметрии можно представить в виде [1]

$$\gamma(i) = 6 \frac{x_P - [t_P(i) - \bar{t}_S(i)]/\sigma_S(i)}{1 - (x_P)^2}. \quad (3)$$

Третий центральный момент исследуемой случайной величины на  $i$ -й фазе обслуживания  $\omega(i)$  определяется следующим образом [1]:

$$\omega(i) = \gamma(i)[\sigma_S(i)]^3. \quad (4)$$

Для маршрута, содержащего  $N$  фаз, необходимо найти среднее значение  $\bar{t}_S$ , дисперсию  $\sigma_S^2$  и асимметрию  $\gamma$  времени задержки. Эти параметры вычисляются по формулам [1]

$$\bar{t}_S = \sum_{i=1}^N \bar{t}_S(i), \quad \sigma_S^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_S^2(i), \quad \gamma = \left( \sum_{i=1}^N \omega(i) \right) / (\sigma_S)^3. \quad (5)$$

Согласно [1]  $p$ -квантиль ФР времени задержки в СМО из  $N$  фаз определяется соотношением

$$t_P = \bar{t}_S + \sigma_S \left( x_P - \frac{\gamma [1 - (x_P)^2]}{6} \right). \quad (6)$$

Проверку точности метода расчета  $t_P$ , рекомендуемого МСЭ, целесообразно провести для ряда моделей многофазной СМО, которые позволяют найти точные значения квантиля случайной величины. Практический интерес представляют ФР с возможными значениями на положительной полуоси. В ряде случаев допустимы сколь угодно большие значения времени  $t$ . В данной работе соответствующие ФР  $F_U(t)$  называются распределениями класса U (unbounded, т. е. неограниченные).

Некоторые модели можно исследовать с помощью распределений  $F(t)$ , для которых возможные значения заданы на ограниченном интервале времени. Для них также справедливо условие  $t \geq 0$ . Соответствующие ФР  $F_B(t)$  называются распределениями класса B (bounded, т. е. ограниченные). Распределения класса B полезны для исследования многофазных СМО, в которых задано максимально возможное время пребывания заявок  $t_{\max}$ . При  $t > t_{\max}$  функция  $F_B(t)$  равна единице. Другое применение распределений класса B основано на использовании статистических данных, при сборе которых никогда не были зафиксированы значения времени пребывания заявок, превышающие  $t_{\max}$ .



Ошибки при расчете квантиля для функции  $F_U(t)$  Таблица 1

Метод расчета квантиля при $F_U(t) = 0,999$	Количество фаз обслуживания IP-пакетов, %		
	$N = 3$	$N = 5$	$N = 7$
Рекомендуемый МСЭ	0,9	0,7	0,7
Гамма-распределение	6,3	4,6	4,2
Ряд Эджворта	2,6	2,0	1,6

Ошибки при расчете квантиля для функции  $F_B(t)$  Таблица 2

Метод расчета квантиля при $F_U(t) = 0,999$	Количество фаз обслуживания IP-пакетов, %		
	$N = 3$	$N = 5$	$N = 7$
Рекомендуемый МСЭ	5,9	5,7	4,9
Гамма-распределение	24,8	14,4	10,3
Ряд Эджворта	7,8	3,4	2,0

находятся в пределах, допустимых с точки зрения практики проектирования узлов коммутации. Следовательно, метод МСЭ можно считать весьма эффективным. Во второй и третьей строках табл. 1 приведены значения ошибок, возникающих при аппроксимации ФР  $F_U(t)$  с помощью гамма-распределения [4] и ряда Эджворта [6]. Использование таких замен функции  $F_U(t)$  приводит к росту ошибок, которые тем не менее находятся в приемлемых пределах для инженерных расчетов. Результаты, приведенные в табл. 1, получены для нагрузки каждой фазы  $\rho$ , равной 0,5. Величина  $\rho$  определяется по формуле [2]

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

В табл. 2 приведены значения относительных ошибок, имеющих место при расчете квантиля для функции  $F_B(t)$ . Во второй и третьей строках указаны относительные ошибки, обусловленные аппроксимацией функции  $F_B(t)$  с помощью гамма-распределения и ряда Эджворта. Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать вывод, что метод, рекомендуемый МСЭ, позволяет рассчитывать 0,999-й квантиль с точностью, приемлемой для инженерных расчетов. Следует отметить, что при увеличении количества фаз обслуживания более точным становится метод расчета квантиля, основанный на ряде Эджворта. Из табл. 1, 2 следует, что при увеличении количества фаз обслуживания ошибка в оценке квантиля уменьшается.

Соотношения (3)-(6) позволяют решить поставленную задачу – найти такое значение  $\mu_{IPDV}$ , при котором разность  $t_P - t_{\min}$  равна нормированному значению IPDV. Как и выше, целесообразно считать, что параметры трафика на всех фазах обслуживания идентичны. Параметры, необходимые для оценки  $\mu_{IPDV}$ , приведены в [3]. Исключением является квантиль  $t_P(i)$ .

**Оценка квантиля  $t_P(i)$ .** Судя по численным оценкам, приведенным в табл. 1, 2, с ростом количества фаз, через которые проходят заявки (IP-пакеты), точность аппроксимации повышается. Однако найти аппроксимацию, которая становится приемлемой для одной фазы, не удастся. Это усложняет применение метода МСЭ для планирования сети, т. е. в тех случаях, когда значение  $t_P(i)$  невозможно измерить.

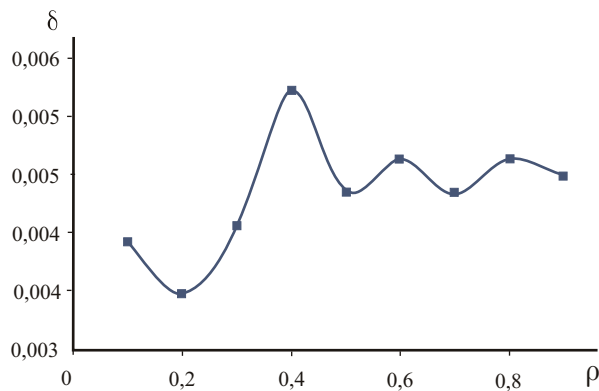


Рис. 1. Зависимость относительной ошибки в расчете квантиля от нагрузки

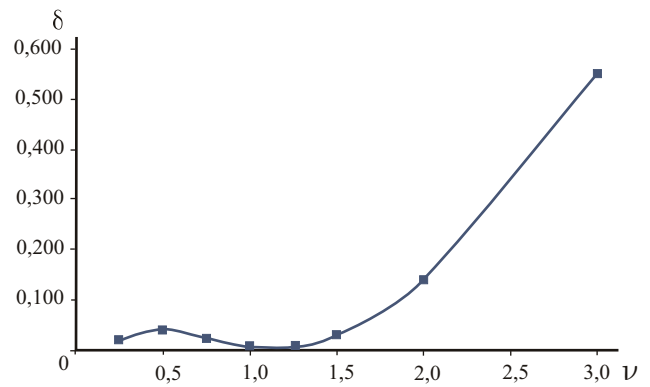


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки в расчете квантиля от коэффициента вариации

Для определения величины  $t_P(i)$  можно использовать результаты работы [3], в которой получены кумулянты времени ожидания заявок в СМО с произвольным характером входящего потока заявок и постоянным временем их обслуживания. Для систем с постоянным временем обслуживания заявок кумулянты времени задержки вычисляются элементарно. Тогда для одной фазы обслуживания можно считать известными следующие три параметра времени задержки заявок: среднее значение, среднеквадратичное отклонение и асимметрию. Далее из формулы (3) несложно получить соотношение для расчета квантиля

$$t_P(i) = \sigma_S(i)x_P + \bar{t}_S(i) - \frac{\sigma_S(i)\gamma(i)(1 - (x_P)^2)}{6}. \quad (9)$$

Для оценки точности предложенного способа расчета квантиля проведены вычисления точного значения  $t_P(i)$  для некоторых законов распределений. На рис. 1 показана зависимость относительной ошибки  $\delta$  в расчете квантиля для экспоненциального распределения времени задержки IP-пакетов от нагрузки. Очевидно, что величина ошибки находится в допустимых пределах, т. е. соотношение (9) может быть использовано для оценки квантиля  $t_P(i)$  для одной фазы обслуживания. Это утверждение справедливо, если распределение времени задержки подобно экспоненциальному, для которого коэффициент вариации равен единице.

На рис. 2 приведена зависимость относительной ошибки в расчете квантиля  $t_P(i)$  от коэффициента вариации времени задержки IP-пакетов  $\nu$ . В качестве аппроксимации ФР времени задержки IP-пакетов выбрано распределение Вейбулла – Гнеденко [4]. Выбор распределения обусловлен тем, что для него коэффициент вариации изменяется в широком диапазоне. Из рис. 2 следует, что в интервале изменения коэффициента вариации от нуля до примерно двух относительная ошибка в оценке квантиля приемлема для инженерных расчетов. Для распределений с большим значением коэффициента вариации целесообразно разработать более точный метод расчета квантиля.

**Заключение.** В данной работе предложен метод оценки производительности узлов коммутации, предназначенных для использования в сетях связи следующего поколения. Величина производительности узлов коммутации должна выбираться таким образом, чтобы выполнялись два ограничения, установленные МСЭ на параметры времени задержки IP-пакетов при их передаче между двумя интерфейсами пользователь – сеть. Получены все соотношения, необходимые для вычисления производительности узлов коммутации.

## Список литературы

1. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. Geneva, 2006.
2. КЛЕЙНРОК Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979.
3. Соколов А. Н. Метод оценки задержки IP-пакетов в узле коммутации // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2009. № 4. С. 37-40.
4. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001.
5. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.: Наука, 1974.
6. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.

*Соколов Андрей Николаевич – асп. Санкт-Петербургского  
государственного университета телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича;  
e-mail: a.n.sokolov@hotmail.com*

*Дата поступления – 03.03.10*