



УДК 519.872

А. З. Меликов, чл.-кор. НАН Азербайджана, **В. Ш. Фейзиев**, аспирант
Ин-т кибернетики Национальной академии наук Азербайджана
(Азербайджан, AZ1141, Баку, ул.Ф.Агаева, 9, E-mail:agassi@science.az)

Приближенный расчет характеристик модели совместной передачи речи и данных в беспроводных сетях сотовой связи

(Статью представил д-р техн. наук В. Ф. Верлань)

Построена модель мультисервисной беспроводной сети связи, поддерживающей обслуживание речевых сообщений и потоков данных. Речевые сообщения имеют абсолютный приоритет перед потоками данных, при этом для ожидания в очереди нетерпеливых потоков данных имеется ограниченный буфер. Предложена вычислительная процедура приближенного расчета характеристик этой модели и приведены результаты численных экспериментов. Приведен пример.

Побудовано модель мультисервісної безпроводової мережі зв'язку, яка підтримує обслуговування мовних повідомлень і потоків даних. Мовні повідомлення мають абсолютний пріоритет перед потоками даних, при цьому для очікування в черзі нетерплячих потоків даних є обмежений буфер. Запропоновано обчислювальну процедуру наближеного розрахунку характеристик цієї моделі та наведено результати чисельних експериментів. Наведено приклад.

К л ю ч е в ы е с л о в а: мобильная мультисервисная сеть, речевые сообщения, потоки данных.

Технологическое развитие в области беспроводных сетей привело к появлению мобильных мультимедийных мультисервисных сетей связи, в рамках которых осуществляется совместное обслуживание широкого спектра разнотипной информации, от узкополосных речевых сообщений до широкополосных данных (например, изображения).

Возрастающее число мобильных пользователей, а также различные требования, которые они предъявляют к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) и требуемой полосе передачи, делают актуальными вопросы эффективного использования дефицитных радиоресурсов мультимедийных беспроводных сетей. Сложность решения этих вопросов обусловлена тем, что в указанных сетях очень важно учитывать наличие эффекта хэндовер, который заключается в переходе активного мобильного пользователя от данной соты к соседней, при этом занятие радиоканала в новой

соте должно происходить незаметно для пользователя. Если продолжение обслуживания таких пользователей (h -вызовов) невозможно, происходит вынужденное прерывание. С точки зрения пользователей прерывание обработки h -вызова является более нежелательным, чем отказ от обработки нового вызова, появляющегося в данной соте. Поэтому предлагаются различные схемы приоритизации h -вызовов [1—4].

Разработанный алгоритм позволяет осуществлять приближенный расчет характеристик модели совместной передачи речевых сообщений (v -вызовов) и данных (d -вызовов) в мобильной мультимедийной сети, в которой h -вызовы речевых сообщений имеют абсолютный приоритет перед вызовами данных. Подобный алгоритм решения указанной задачи описан в [5], однако он эффективен лишь для сетей малой размерности. Предлагаемый алгоритм позволяет решить данную задачу для сетей произвольной размерности. Он основан на методе приближенного расчета стационарного распределения двумерных цепей Маркова [6].

Описание модели. Рассмотрим однородную беспроводную мультимедийную сеть связи для передачи речи и данных. Однородность сети означает, что в ней каждая сота может быть исследована изолированно от других сот, и следовательно, показатели QoS всей сети могут быть найдены на основе соответствующих показателей QoS отдельных сот.

Пусть некоторая сота содержит $N > 1$ радиоканалов и каждый речевой вызов (новый или хэндовер v -вызов) требует для передачи только один свободный радиоканал. Они обслуживаются согласно схеме без ожидания, т. е. не принятый v -вызов теряется (блокируется).

Стратегия доступа речевых вызовов определяется следующим образом. Новый v -вызов ($o.v$ -вызов) принимается для обслуживания, если в момент его поступления в системе имеется хотя бы один свободный канал. Хэндовер v -вызов ($h.v$ -вызов) имеет абсолютный приоритет перед d -вызовами любого типа (новый или хэндовер). Это означает, что если в момент поступления $h.v$ -вызова в соте отсутствует свободный канал, то поступивший вызов может прерывать обслуживание d -вызова, обслуживаемого одним каналом. Прерванный d -вызов в дальнейшем будет обслуживаться с места прерывания. Однако прерывание обслуживания d -вызова может происходить лишь тогда, когда в очереди d -вызовов (с максимальной длиной R) имеется хотя бы одно свободное место для прерванного вызова, так как прерванный вызов присоединяется к очереди; в противном случае прерывания не происходит и поступивший $h.v$ -вызов теряется.

Стратегия доступа для данных определяется следующим образом. Прежде всего заметим, что d -вызовы являются эластичными, т. е. могут обслуживаться одним каналом, но могут занимать и все свободные кана-

лы. Поступивший d -вызов любого типа (новый или хэндовер) занимает все свободные от обслуживания v -вызовов каналы, и при поступлении d -вызова (нового или хэндовер) часть каналов, занятых обслуживанием d -вызовов, выделяется для его обслуживания. При этом для распределения каналов между d -вызовами может быть использована любая схема распределения. Этот процесс продолжается до тех пор, пока каждый d -вызов обслуживается одним каналом. После этого момента только $h.d$ -вызовы присоединяются к очереди, а новые d -вызовы ($o.d$ -вызовы) при занятости всех каналов теряются. Хэндовер d -вызовы в очереди являются нетерпеливыми, т. е. после ожидания в очереди некоторое случайное время $h.d$ -вызов может покинуть очередь без возобновления его обслуживания в дальнейшем (например, пользователи Интернета после ожидания подключения в течение определенного времени прерывают попытку соединения).

Введем следующие обозначения: $\lambda_{o.v}(\lambda_{o.d})$ — интенсивность пуассоновского потока $o.v$ -вызовов ($o.d$ -вызовов); $\lambda_{h.v}(\lambda_{h.d})$ — интенсивность пуассоновского потока $h.v$ -вызовов ($h.d$ -вызовов); $\mu_v^{-1}(\mu_d^{-1})$ — среднее время обработки одного v -вызова (d -вызова); $\tau_v^{-1}(\tau_d^{-1})$ — среднее время пребывания v -вызова (d -вызова) в соте; γ^{-1} — среднее время терпеливости d -вызовов в очереди; N — общее число каналов соты; R — максимально допустимая длина очереди $h.d$ -вызовов.

Для того чтобы получить обозримые результаты для этой достаточно сложной модели, будем предполагать, что время обработки вызовов, время их пребывания в соте, а также время терпеливости d -вызовов имеют экспоненциальное распределение с указанными выше параметрами. При этом время обработки d -вызовов пропорционально числу каналов, занятых их обслуживанием.

Расчет характеристик модели. В стационарном режиме состояние данной системы в произвольный момент времени может быть задано с помощью двумерного вектора $\mathbf{n}=(n_1, n_2)$, где n_1 — число v -вызовов в каналах, $n_1 = \overline{0, N}$, а n_2 — общее число d -вызовов в системе (в каналах и очереди), $n_2 = \overline{0, N+R}$. Множество всех возможных состояний системы обозначим $S := \{\mathbf{n}: n_1 = \overline{0, N}, n_2 = \overline{0, N+R-n_1}\}$.

Исходя из описания механизма обслуживания разнотипных вызовов, можно заключить, что если система находится в состоянии $\mathbf{n}=(n_1, n_2)$, то число d -вызовов в каналах (n_2^s) и в очереди (n_2^q) определяются так: $n_2^s = \min(N-n_1, n_2)$, $n_2^q = (n_1+n_2-N)^+$, где $x^+ = \max(0, x)$. На основании стратегии доступа разнотипных вызовов в систему, а также учитывая механизм их обслуживания, заключаем, что элементы производящей матрицы соответствующей цепи Маркова $q(\mathbf{n}, \mathbf{n}')$, $\mathbf{n}, \mathbf{n}' \in S$ определяются из следующих соотношений (рис. 1):

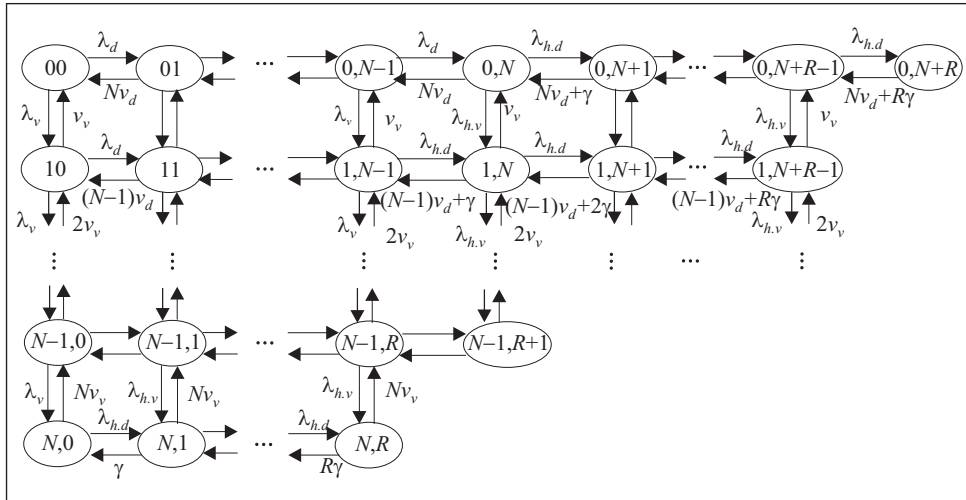


Рис. 1. Граф-схема модели

$$q(\mathbf{n}, \mathbf{n}') = \begin{cases} \lambda_d, & \text{если } n_1 + n_2 < N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_2, \\ \lambda_{h,d}, & \text{если } n_1 + n_2 \geq N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_2, \\ \lambda_v, & \text{если } n_1 + n_2 < N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_1, \\ \lambda_{h,v}, & \text{если } n_1 + n_2 \geq N, n_1 + n_2 < N + R, \mathbf{n}' = \mathbf{n} + \mathbf{e}_1, \\ (N - n_1)v_d, & \text{если } n_1 \neq N, n_1 + n_2 \leq N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_2, \\ (N - n_1)v_d + (n_1 + n_2 - N)\gamma, & \text{если } n_1 \neq N, n_1 + n_2 > N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_2, \\ n_2\gamma, & \text{если } n_1 = N, \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_2, \\ n_1v_v, & \text{если } \mathbf{n}' = \mathbf{n} - \mathbf{e}_1, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{e}_1 = (1,0)$, $\mathbf{e}_2 = (0,1)$, $v_x = \mu_x + \tau_x$, $\lambda_x = \lambda_{o,x} + \lambda_{h,x}$, $x \in \{d, v\}$. Стационарную вероятность состояния $\mathbf{n} \in S$ обозначим $p(\mathbf{n})$. Тогда, с помощью соотношений (1) удастся составить систему уравнений равновесия (СУР) для определения стационарных вероятностей состояний (явный вид этой СУР приведен в примере).

Характеристики системы, в том числе показатели QoS разнотипных вызовов, могут быть определены через стационарное распределение модели. Так, вероятности блокировки новых v -вызовов $PB_{o,v}$ и d -вызовов $PB_{o,d}$ являются одинаковыми и определяются так:

$$PB_{o,v} = PB_{o,d} = \sum_{n_1=0}^N \sum_{n_2=N-n_1}^{N+R-n_1} p(n_1, n_2). \quad (2)$$

Вероятности потери $h.v$ -вызовов $PD_{h.v}$ и $h.d$ -вызовов $PD_{h.d}$ определяются из выражений

$$PD_{h.v} = \sum_{n_2=0}^R p(N, n_2) + \sum_{n_1=0}^{N-1} p(n_1, N+R-n_1), \quad (3)$$

$$PD_{h.d} = \sum_{n_1=0}^N p(n_1, N+R-n_1) + \frac{1}{\lambda_{h.d} + \lambda_{h.v} P_p} \sum_{i=1}^R Q(i), \quad (4)$$

где P_p — означает вероятность того, что $h.v$ -вызов прерывает обслуживание d -вызова,

$$P_p = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=N-n_1}^{N+R-n_1-1} p(n_1, n_2); \quad (5)$$

$Q(i)$ — оценка интенсивности потери d -вызовов из очереди в позиции i вследствие их нетерпеливости,

$$Q(i) = \sum_{n_1=0}^N i \gamma p(n_1, N-n_1+i), \quad i = \overline{1, R}. \quad (6)$$

Среднее число d -вызовов в очереди K_q и в системе K_s определяется так:

$$K_q = \sum_{n_1=0}^N \sum_{i=1}^R i p(n_1, N-n_1+i), \quad (7)$$

$$K_s = \sum_{n_1=0}^N \sum_{n_2=1}^{N+R-n_1} n_2 p(n_1, n_2). \quad (8)$$

Среднее число каналов, занятых обслуживанием всех d -вызовов, определяется так:

$$\tilde{N}_d = \sum_{n_1=0}^N \sum_{n_2=1}^{N+R-n_1} (N-n_1) p(n_1, n_2). \quad (9)$$

Из (8) и (9) находим среднее число каналов, занятых обслуживанием одного d -вызова:

$$\tilde{N}_d^0 = \tilde{N}_d / K_s. \quad (10)$$

Таким образом, для вычисления характеристик системы (2)—(4), (7)—(10) потребуется предварительное нахождение стационарного распределения $p(\mathbf{n})$, $\mathbf{n} \in S$, соответствующей двумерной цепи Маркова. Однако решение данной задачи с помощью СУР связано с вычислительными трудностями при больших значениях N и R . Поэтому для нахождения характеристик системы предлагается использовать подход, предложенный в работе [6].

Рассмотрим разбиение множества возможных состояний системы:

$$S = \bigcup_{i=0}^N S_i, S_i \cap S_j = \emptyset, i \neq j, \quad (11)$$

где $S_i := \{\mathbf{n} \in S; n_1 = i\}$, т. е. класс состояний S_i содержит все те микросостояния (МС) $\mathbf{n} \in S$, в которых число ν -вызовов составляет $i, i = \overline{0, N}$. На основе разбиения (11) строим функцию укрупнения $U(\mathbf{n}) = \langle i \rangle$, если $\mathbf{n} \in S_i$, при $U: S \rightarrow Z_N, Z_N := \{0, 1, 2, \dots, N\}$, которая определяет укрупненную (относительно исходной) модель с пространством состояний Z_N . Для нахождения элементов производящей матрицы укрупненной модели потребуются предварительное нахождение стационарного распределения внутри классов $S_i, i = \overline{0, N}$.

Каждая расщепленная модель с пространством состояний $S_i, i = \overline{0, N}$, представляет собой одномерный процесс размножения и гибели. Пусть $\rho_i(j)$ означает стационарную вероятность состояния (i, j) в расщепленной модели с пространством состояний S_i . Тогда для $i = \overline{0, N-1}$ получим

$$\rho_i(j) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_d}{(N-i)v_d} \right)^j \rho_i(0), & \text{если } 1 \leq j \leq N-i, \\ \left(\frac{\lambda_d}{(N-i)v_d} \right)^{N-i} \frac{\lambda_{h,d}^{i+j-N}}{\prod_{t=1}^{i+j-N} ((N-i)v_d + t\gamma)} \rho_i(0), & \text{если } N-i+1 \leq j \leq N+R-i, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\rho_i(0) = \left(\sum_{j=0}^{N-i} \left(\frac{\lambda_d}{(N-i)v_d} \right)^j + \left(\frac{\lambda_d}{(N-i)v_d} \right)^{N-i} \sum_{j=N-i+1}^{N+R-i} \frac{\lambda_{h,d}^{i+j-N}}{\prod_{t=1}^{i+j-N} ((N-i)v_d + t\gamma)} \right)^{-1}; \quad (13)$$

для $i = N$

$$\rho_N(j) = \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_{h,d}}{\gamma} \right)^j \rho_N(0), \quad j = \overline{1, R}, \quad (14)$$

где

$$\rho_N(0) = \left(\sum_{j=0}^R \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_{h,d}}{\gamma} \right)^j \right)^{-1}. \quad (15)$$

Используя (1) и (12)—(15), находим элементы производящей матрицы $q(<i>, <i'>)$, $i, i' \in Z_N$, укрупненной модели:

$$q(<i>, <i'>) = \begin{cases} \lambda_v \sum_{j=0}^{N-i-1} \rho_i(j) + \lambda_{h,v} \sum_{j=N-i}^{N+R-i-1} \rho_i(j), & \text{если } i \leq N-1, i' = i+1, \\ i v_v, & \text{если } i \leq N, i' = i-1. \end{cases} \quad (16)$$

Укрупненная модель представляет собой процесс размножения и гибели, соответствующие интенсивности которого определяются из (16). Находим стационарное распределение укрупненной модели $\pi(<i>)$, $i \in Z_N$:

$$\pi(<i>) = \prod_{j=0}^{i-1} \frac{q(<i>, <i+1>)}{q(<i+1>, <i>)} \pi(<0>),$$

где

$$\pi(<0>) = \left(1 + \sum_{j=1}^N \prod_{t=0}^{j-1} \frac{q(<j>, <j+1>)}{q(<j+1>, <j>)} \right)^{-1}.$$

Приближенное стационарное распределение исходной модели имеет вид: $p(n_1, n_2) \approx \rho_{n_1}(n_2) \pi(<n_1>)$, $(n_1, n_2) \in S$.

Как видим, вычислительная процедура приближенного расчета характеристик системы (2)—(4), (7)—(10) достаточно проста.

Данный подход может быть использован и для расчета характеристик модели с неэластичными d -вызовами. Для такой модели единственное отличие от предложенной процедуры заключается в нахождении стационарного распределения расщепленных моделей.

Численные результаты. На основе предложенной вычислительной процедуры разработано соответствующее программное обеспечение и выполнены вычислительные эксперименты. Простота предложенной процедуры позволяет осуществить анализ исследуемой системы практически в любом диапазоне изменения ее структурных и нагрузочных параметров.

На рис. 2 представлены результаты численных экспериментов по определению вероятностей потерь разнотипных вызовов при изменении общего числа каналов, а на рис. 3 — их изменение относительно среднего времени терпеливости $h.d$ -вызовов. При изучении поведения указанных характеристик относительно изменения общего числа каналов были выбраны такие исходные данные: $\lambda_d = 11$, $\lambda_{h,d} = 10$, $\lambda_v = 0,8$, $\lambda_{h,v} = 0,008$, $v_d = 90$, $v_v = 0,5$, $\gamma = 3$. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Вероятность потери $o.v$ -вызовов (по формуле (3)) и вероятность потери $o.d$ -вызовов является монотонно убывающей функцией относительно общего числа каналов системы, при этом для каждого фикси-

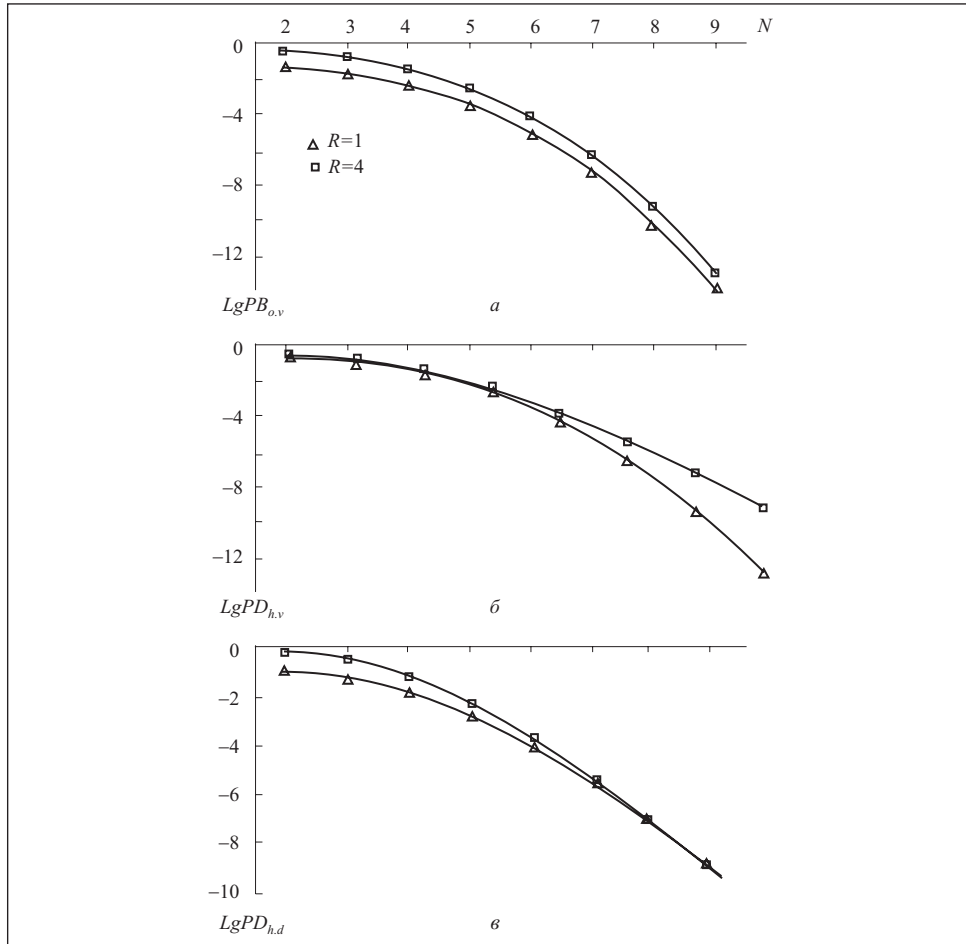


Рис. 2. Зависимость вероятности потери $o.v$ -вызовов (а), $h.v$ -вызовов (б) и $h.d$ -вызовов (в) от числа каналов соты

рованного значения числа каналов она монотонно возрастает относительно размера буфера для ожидания $h.d$ -вызовов (см. рис. 2, а). Эти результаты имеют вполне логический смысл. Действительно, увеличение размера буфера для $h.d$ -вызовов приводит к увеличению их средней длины очереди и они часто занимают освобожденные каналы; поскольку $o.v$ -вызовы ($o.d$ -вызовы) не могут прерывать обслуживание d -вызовов, с увеличением размера буфера также увеличивается вероятность потери $o.v$ -вызовов ($o.d$ -вызовов).

2. Поведение вероятности потери $h.v$ -вызовов относительно общего числа каналов системы и размера буфера для ожидания $h.d$ -вызовов (см. рис. 2, б) подобно поведению вероятности потери $o.v$ -вызовов и объяс-

няется описанными выше причинами. Следует заметить, что для выбранных исходных данных вероятность потери $h.v$ -вызовов при малых значениях числа каналов почти не зависит от размера буфера, а при увеличении числа каналов эта функция резко возрастает при малом изменении размера буфера для ожидания $h.d$ -вызовов. Так, например, при $N = 8$ значения этой функции приблизительно равны 10^{-9} и 10^{-7} соответственно при $R = 1$ и $R = 4$, а при $N = 9$ и тех же значениях R указанные значения функции приблизительно равны 10^{-13} и 10^{-9} .

3. Вероятность потери $h.d$ -вызовов является монотонно убывающей функцией относительно общего числа каналов системы (см. рис. 2, в). При малых значениях числа каналов она также монотонно возрастает относительно размера буфера для ожидания $h.d$ -вызовов вследствие частых потерь из очереди в результате их нетерпеливости. Однако при увеличении числа каналов эта составляющая вероятности потери компенсируется с уменьшением потери за счет увеличения скорости их обслуживания.

При изучении поведения характеристик системы относительно среднего времени терпеливости $h.d$ -вызовов (см. рис. 3) исходные данные экспериментов были выбраны такие: $N = 4$, $\lambda_d = 8$, $\lambda_{h,d} = 1,2$, $\lambda_v = 0,8$, $\lambda_{h,v} = 0,01$, $\nu_d = 85$, $\nu_v = 0,9$. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Вероятность потери $o.v$ -вызовов (по формуле (3)) и вероятность потери $o.d$ -вызовов является убывающей функцией относительно времени терпеливости $h.d$ -вызовов (см. рис. 3, а), так как увеличение интенсивности потери $h.d$ -вызовов из очереди одновременно увеличивает шансы $o.v$ -вызовов и $o.d$ -вызовов для доступа в систему. При этом, чем меньше размер буфера для ожидания $h.d$ -вызовов, тем меньше вероятность потери $o.v$ -вызовов ($o.d$ -вызовов).

2. Вероятность потери $h.d$ -вызовов является монотонно возрастающей функцией относительно времени терпеливости $h.d$ -вызовов (см. рис. 3, б), что вполне соответствует теоретическим ожиданиям. При этом, чем меньше размер буфера для ожидания $h.d$ -вызовов, тем больше вероятность потери таких вызовов, так как при одних и тех же значениях интенсивности потери из очереди вследствие их нетерпеливости, вероятность потери из малой очереди больше, чем вероятность потери из большой очереди.

Таким образом, предложенная вычислительная процедура позволяет не только осуществить анализ характеристик системы совместной передачи речи и данных, но с ее помощью можно решить ряд задач для их улучшения. Кроме того, применение данного подхода позволяет разработать соответствующую вычислительную процедуру для анализа характеристик модели подобной системы с бесконечной очередью d -вызовов. Эта проблема представляет собой предмет специальных исследований.

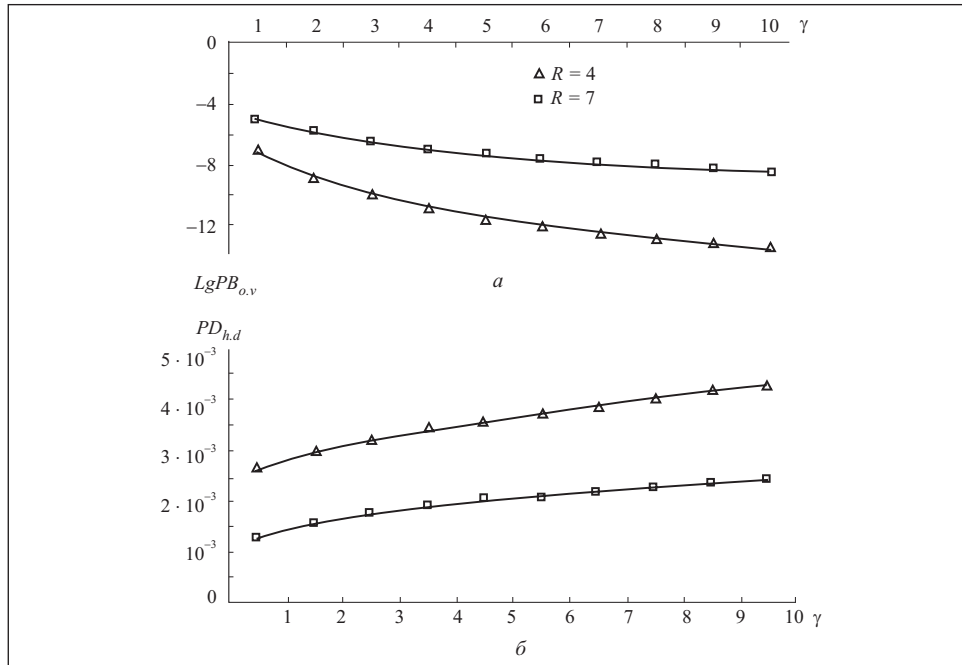


Рис. 3. Зависимость вероятности потери $o.v$ -вызовов (а), $h.v$ -вызовов (б) от среднего времени терпеливости d -вызовов

Пример определения стационарных вероятностей состояний.

Пусть $\mathbf{n} \in S_i$, где $i \neq N$. Согласно принятой стратегии доступа и механизма обслуживания разнотипных заявок заключаем, что из этого состояния можно перейти в следующие состояния.

1. В состояние $\mathbf{n} + \mathbf{e}_1 \in S_{i+1}$ с интенсивностью λ_v в результате поступления v -вызова любого типа, если в этот момент имеется хотя бы один свободный канал, т. е. если $n_1 + n_2 \leq N - 1$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $N \leq n_1 + n_2 \leq N + R - 1$, то этот переход происходит с интенсивностью $\lambda_{h.v}$ в результате поступления $h.v$ -вызова при условии прерывания обслуживания одного d -вызова.

2. В состояние $\mathbf{n} + \mathbf{e}_2 \in S_i$ с интенсивностью λ_d в результате поступления d -вызова любого типа, если в этот момент имеется хотя бы один свободный канал, т. е. если $n_1 + n_2 \leq N - 1$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $N \leq n_1 + n_2 \leq N + R - 1$, то этот переход происходит с интенсивностью $\lambda_{h.d}$ в результате поступления $h.d$ -вызова при наличии в очереди хотя бы одного свободного места.

3. В состояние $\mathbf{n} - \mathbf{e}_1 \in S_{i-1}$ с интенсивностью $n_1 v_v$ в результате уменьшения числа v -вызовов в системе (либо в результате окончания времени обслуживания либо в результате хендвер), т.е. если $n_1 > 0$.

4. В состоянии $\mathbf{n} - \mathbf{e}_2 \in S_i$ с интенсивностью $(N - n_1) v_d$ в результате уменьшения числа d -вызовов в системе (либо в результате окончания времени обслуживания либо в результате хендовер), если в этот момент в очереди отсутствуют $h.d$ -вызовы, т. е. если $n_2 > 0, n_1 + n_2 \leq N$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $n_1 + n_2 > N$, то этот переход происходит с интенсивностью $(N - n_1) v_d + (n_1 + n_2 - N) \gamma$ либо в результате окончания времени передачи одного d -вызова либо в результате нетерпеливости $h.d$ -вызова в очереди.

В состоянии $\mathbf{n} \in S_i, i \neq N$ можно попасть из следующих состояний.

1. Из состояния $\mathbf{n} + \mathbf{e}_1 \in S_{i+1}$ с интенсивностью $(n_1 + 1) v_v$ в результате уменьшения числа v -вызовов в системе, т.е. если $n_1 \leq N - 1$.

2. Из состояния $\mathbf{n} + \mathbf{e}_2 \in S_i$ с интенсивностью $(N - n_1) v_d$ в результате уменьшения числа d -вызовов в системе, если в этот момент в очереди отсутствуют $h.d$ -вызовы, т. е. если $n_1 + n_2 + 1 \leq N$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $n_1 + n_2 + 1 > N$, то этот переход происходит с интенсивностью $(N - n_1) v_d + (n_1 + n_2 + 1 - N) \gamma$ либо в результате окончания времени передачи одного d -вызова либо в результате нетерпеливости $h.d$ -вызова в очереди.

3. Из состояния $\mathbf{n} - \mathbf{e}_1 \in S_{i-1}$ с интенсивностью λ_v в результате поступления v -вызова любого типа, если в этот момент имеется хотя бы один свободный канал при $i > 0, n_1 + n_2 - 1 \leq N - 1$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $N \leq n_1 + n_2 - 1 < N + R$, то этот переход происходит с интенсивностью $\lambda_{h,v}$ в результате поступления $h.v$ -вызова при условии прерывания обслуживания одного d -вызова.

4. Из состояния $\mathbf{n} - \mathbf{e}_2 \in S_i$ с интенсивностью λ_d в результате поступления d -вызова любого типа, если в этот момент имеется хотя бы один свободный канал, т. е. если $n_2 > 0, n_1 + n_2 \leq N$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $N + 1 \leq n_1 + n_2 \leq N + R$, то этот переход происходит с интенсивностью $\lambda_{h,d}$ в результате поступления $h.d$ -вызова.

Аналогичным образом из состояния $\mathbf{n} \in S_N$ можно попасть в следующие состояния.

1. В состояние $\mathbf{n} + \mathbf{e}_2 \in S_N$ с интенсивностью $\lambda_{h,d}$ в результате поступления $h.d$ -вызова, если в этот момент в очереди имеется хотя бы одно свободное место, т. е. если $n_2 < R$.

2. В состояние $\mathbf{n} - \mathbf{e}_1 \in S_{N-1}$ с интенсивностью $N v_v$ в результате уменьшения числа v -вызовов в системе.

3. В состояние $\mathbf{n} - \mathbf{e}_2 \in S_N$ с интенсивностью $n_2 \gamma$ в результате нетерпеливости $h.d$ -вызова в очереди, т.е. если $n_2 < 0$.

В состоянии $\mathbf{n} \in S_N$, можно попасть из следующих состояний.

1. Из состояния $\mathbf{n} + \mathbf{e}_2 \in S_N$ с интенсивностью $(n_2 + 1) \gamma$ в результате нетерпеливости $h.d$ -вызова в очереди.

2. Из состояния $\mathbf{n} - \mathbf{e}_1 \in S_{N-1}$ с интенсивностью λ_v в результате поступления v -вызова любого типа, если в этот момент имеется хотя бы один свободный канал, т.е. если $n_2 = 0$. Если компоненты вектора состояния удовлетворяют неравенству $1 \leq n_2 \leq R$, то этот переход происходит с интенсивностью $\lambda_{h,v}$ в результате поступления $h.v$ -вызова при условии прерывания обслуживания одного d -вызова.

3. Из состояния $\mathbf{n} - \mathbf{e}_2 \in S_N$ с интенсивностью $\lambda_{h,d}$ в результате поступления $h.d$ -вызова, если в очереди имеется хотя бы одно свободное место, т.е. если $n_2 > 0$.

С учетом изложенного получаем СУР для стационарных вероятностей состояний:

для состояний $\mathbf{n} \in S_0$

$$\left(\begin{array}{l} \lambda_v u(N - n_2 - 1) + \lambda_{h,v} u(n_2 - N) u(N + R - n_2 - 1) + \lambda_d u(N - n_2 - 1) + \\ + \lambda_{h,d} u(n_2 - N) u(N + R - n_2 - 1) + n_1 v_v + N v_d u(N - n_2) + \\ + (N v_d + (n_2 - N) \gamma) u(n_2 - N - 1) \end{array} \right) p(\mathbf{n}) =$$

$$= v_v p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_1) + (N v_d u(N - n_2 - 1) + (N v_d + (n_2 - N + 1) \gamma) u(n_2 - N)) p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_2) +$$

$$+ (\lambda_d u(N - n_2) + \lambda_{h,d} u(n_2 - N - 1) u(N + R - n_2)) p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_2); \quad (\text{П1})$$

для состояний $\mathbf{n} \in S_i, 1 \leq i \leq N - 1$:

$$\left(\begin{array}{l} \lambda_v u(N - n_2 - n_1 - 1) + \lambda_{h,v} u(n_1 + n_2 - N) u(N + R - n_2 - n_1 - 1) + \\ + \lambda_d u(N - n_1 - n_2 - 1) + \lambda_{h,d} u(n_1 + n_2 - N) u(N + R - n_1 - n_2 - 1) + n_1 v_v + \\ + (N - n_1) v_d u(N - n_1 - n_2) + ((N - n_1) v_d + (n_1 + n_2 - 1) \gamma) u(n_1 + n_2 - N - 1) \end{array} \right) p(\mathbf{n}) =$$

$$= ((N - n_1) v_d u(N - n_1 - n_2 - 1) + ((N - n_1) v_d + (n_1 + n_2 - N + 1) \gamma) u \times$$

$$\times (n_1 + n_2 - N)) p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_2) + (\lambda_d u(N - n_1 - n_2) + \lambda_{h,d} u(n_1 + n_2 - N - 1) u \times$$

$$\times (N + R - n_1 - n_2)) p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_2) + (n_1 + 1) v_d p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_1) + (\lambda_v u(N - n_1 - n_2) +$$

$$+ \lambda_{h,v} u(n_1 + n_2 - N - 1) u(N + R - n_1 - n_2)) p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_1); \quad (\text{П2})$$

для состояний $\mathbf{n} \in S_N$:

$$(\lambda_{h,d} u(R - n_2 - 1) + N v_v + n_2 \gamma) p(\mathbf{n}) =$$

$$= (\lambda_v \delta_{n_2,0} + \lambda_{h,v} (1 - \delta_{n_2,0})) p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_1) + \lambda_{h,d} p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_2) u(n_2 - 1). \quad (\text{П3})$$

В уравнениях (П1) — (П3) $u(x)$ — единичная функция Хэвисайда; $\delta_{x,y}$ — символы Кронеккера,

$$u(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{если } x < 0; \end{cases} \quad \delta_{x,y} = \begin{cases} 1, & \text{если } x = y, \\ 0, & \text{если } x \neq y. \end{cases}$$

Условие нормировки для уравнений (П1) – (П3):

$$\sum_{n \in S} p(\mathbf{n}) = 1. \quad (\text{П4})$$

Таким образом, СУР для данной модели обслуживания имеет вид (П1) — (П4).

The model of multi service wireless communication networks is constructed that supports voice messages and data flows servicing. Voice messages have an absolute priority over data flows at that there is a limited buffer for waiting in queue non-impatient data flows. The computational procedure for approximate calculation of that model characteristics is proposed. The results of the numerical experiments and an example are shown.

1. *Hong D., Rappoport S. S.* Traffic model ad performance analysis of cellular mobile radio telephone systems with prioritized and non prioritized handoff procedure // IEEE Trans. on Vehicular Technology. — 1986. — Vol. 35, № 3. — P. 77—92.
2. *Chang C. J., Su T. T., Chiang Y. Y.* Analysis of a cutoff priority cellular radio system with finite queueing and reneing/dropping // IEEE/ACM Trans. on Networking. — 1994. — Vol. 2, № 3. — P. 166—175.
3. *Lin Y. B., Mohan S., Noerpel A.* Queueing priority channel assignment strategies for handoff and initial access for a PCS network // IEEE Trans. on Vehicular Technology. — 1994. — Vol. 43, № 3. — P. 704—712.
4. *Zhuang W., Bensaou B., Chua K. C.* Adaptive quality of service handoff priority scheme for wireless mobile multimedia networks // IEEE Trans. on Vehicular Technology. — 1999. — Vol. 40, № 2. — P. 494—505.
5. *Zhuang W., Bensaou B., Chua K. C.* Handoff priority scheme with preemptive, finite queueing and reneing in mobile multiservice networks // Telecommunication Systems.— 2000. — Vol. 15. — P. 37—51.
6. *Melikov A. Z., Babayev A. T.* Refined approximations for performance analysis and optimization of queueing model with guard channels for handovers in cellular networks // Computer Communications. — 2006. — Vol. 29. — P. 1386—1392.

Поступила 22.02.07

МЕЛИКОВ Агаси Зарбали оглы, чл.-кор. НАН Азербайджана, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией Ин-та кибернетики НАН Азербайджана. В 1977г. окончил Бакинский госуниверситет. Область научных исследований — моделирование коммуникационных сетей, анализ и оптимизация систем и сетей массового обслуживания.

ФЕЙЗИЕВ Вагиф Шейдулла оглы, аспирант Ин-та кибернетики НАН Азербайджана. В 2005 г. окончил магистратуру Бакинского госуниверситета. Область научных исследований — моделирование коммуникационных сетей, анализ и оптимизация систем и сетей массового обслуживания.