



УДК 519.872

А. З. Меликов, чл.-кор. НАН Азербайджана,
Ф. Н. Нагиев, Т. С. Казиев, кандидаты техн. наук,
Ин-т кибернетики Национальной академии наук Азербайджана
(ул.Ф.Агаева, 9, AZ1141, Баку, Азербайджан,
E-mail:agassi@science.az)

Анализ моделей многоскоростных систем с неэластичными и эластичными заявками

(Статью представил д-р техн. наук В. П. Симоненко)

Приведены результаты исследования моделей многоскоростных систем обслуживания неэластичных (нэл-заявки) и эластичных (эл-заявки) заявок. Предполагается, что нэл-заявки во всем периоде обслуживания занимают одновременно $b > 1$ каналов системы, и все каналы начинают и завершают обслуживание одной нэл-заявки одновременно. Эластичные заявки в момент поступления занимают все свободные каналы системы одновременно, при этом в любой момент времени на обслуживании может находиться не более одной эл-заявки. Исследованы модели двух типов: с равноправным доступом для заявок обоих типов и с ограниченным доступом для нэл-заявок. Разработаны простые вычислительные процедуры для расчета характеристик исследуемых моделей и приведены результаты численных экспериментов.

Наведено результати дослідження моделей багатошвидкісних систем обслуговування нееластичних (нел-заявки) та еластичних (ел-заявки) заявок. Зроблено припущення, що нел-заявки протягом всього періоду обслуговування займають одночасно $b > 1$ каналів системи і всі канали починають та закінчують обслуговування однієї нел-заявки одночасно. Еластичні заявки у момент надходження займають усі вільні канали системи одночасно, при цьому у будь-який момент часу на обслуговуванні може знаходитись не більше однієї ел-заявки. Досліджено моделі двох типів: з рівноправним доступом для заявок обох типів та з обмеженим доступом для нел-заявок. Розроблено прості обчислювальні процедури для розрахунку характеристик досліджуваних моделей та наведено результати числових експериментів.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многоскоростная система обслуживания, неэластичные и эластичные заявки, алгоритмы расчета.

Беспроводные мультисервисные сети связи на уровне сообщения достаточно точно описываются с помощью моделей многоскоростных систем обслуживания (Multirate Queue (MRQ)), в которых разнотипные заявки одновременно обслуживает случайное число каналов. В большинстве работ [1—4] предполагается, что требуемая ширина полосы для обработки

разнотипных заявок становится известной лишь в момент их поступления, и эта величина постоянна на всем периоде обслуживания каждой заявки. Это означает, что все каналы, обслуживающие данную широкополосную заявку начинают и завершают свою работу одновременно. Такие модели MRQ назовем моделями с неэластичными заявками [1—7].

Вместе с тем, в последние годы в связи с развитием технологии кодирования и сжатия некоторые типы мультимедийной информации становятся эластичными, т.е. в зависимости от текущей нагрузки некоторые типы информации могут изменить требуемую полосу передачи. Иными словами, ширина некоторых заявок может быть адаптирована к текущей возможности пропускных способностей каналов сети. Так, например, если сеть переагружена, то широкополосная видеоинформация может стать просто узкополосной речевой информацией [8—10]. Важным достоинством беспроводных мультисервисных сетей с эластичными сообщениями является достаточно высокая (по сравнению с сетями с неэластичными сообщениями) утилизация их радио ресурсов.

Несмотря на широкое распространение сетей с эластичными сообщениями их математические модели недостаточно исследованы [11, с. 41—60, 12, 13]. А модели MRQ, в которых осуществляются совместное обслуживание неэластичных и эластичных заявок, в доступной литературе почти не исследованы. Актуальность их исследования не вызывает никаких сомнений, так как не все типы сообщений могут становиться эластичными.

Предлагаемый подход к расчету показателей качества обслуживания (Quality of Service (QoS)) моделей MRQ с неэластичными и эластичными заявками основан на результатах работы [14].

Описание модели. На вход $N > 1$ канальной системы поступают пуассоновские потоки неэластичных (нэл) и эластичных (эл) заявок. Интенсивность поступления нэл-заявок (эл-заявок) равна λ_1 (λ_2). Число каналов, требуемых для обслуживания одной нэл-заявки, — постоянная величина, равная b , $1 \leq b \leq N$, т. е. для начала обслуживания поступившей нэл-заявки потребуется не менее b свободных каналов системы и все каналы начинают и завершают обслуживание данной заявки одновременно.

Обслуживание одной эл-заявки происходит следующим образом. Поступившая эл-заявка получает отказ (блокируется), если в момент ее поступления либо в системе уже имеется одна эл-заявка, либо все каналы заняты обслуживанием нэл-заявок. Отсюда следует, что в произвольный момент времени в системе не может быть более одной эл-заявки. В момент поступления эл-заявка занимает все свободные каналы системы, и ее обслуживание начинается всеми каналами одновременно. При этом время обслуживания одним каналом, имеющее показательное распределение, равно

μ^{-1} (для заявок обоих типов) и интенсивность обслуживания пропорциональна числу каналов обслуживания. Если в момент поступления нэл-заявки в системе имеется эл-заявка, то необходимое число каналов переключается для обслуживания поступившей нэл-заявки, при этом уменьшается интенсивность обслуживания эл-заявки. Возможны различные схемы переключения каналов. Рассмотрим две наиболее важные из них. Для простоты изложения, не нарушая общности, предположим, что $b = 1$.

Модель с равноправным доступом для заявок обоих типов. Предположим, что заявки обоих типов имеют равноправный доступ к каналам системы, и при этом не допускается вытеснение заявок любого типа из каналов. Тогда, исходя из изложенного выше заключаем, что состояние данной системы в произвольный момент времени может быть задано двумерным вектором $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$, где k_1 (k_2) — число нэл-заявок (эл-заявок) в системе, $k_1 = 0, 1, 2, \dots, N$, $k_2 = 0, 1$. Тогда фазовое пространство состояний (ФПС) системы определяется так:

$$S := \{\mathbf{k} : k_1 = 0, 1, \dots, N, k_2 = 0, 1, k_1 + k_2 \leq N\}. \quad (1)$$

Определим возможные переходы между состояниями ФПС (1) и их интенсивности. Поскольку переходы между состояниями возможны лишь в моменты поступления заявок и их уходов из системы, рассмотрим эти события в отдельности.

При поступлении нэл-заявки происходит переход из состояния \mathbf{k} в состояние $\mathbf{k} + \mathbf{e}_1$, если $k_1 \leq N - 1$ и $k_2 = 0$ или $k_1 \leq N - 2$ и $k_2 = 1$, где $\mathbf{e}_1 = (1, 0)$. При поступлении эл-заявки происходит переход из состояния \mathbf{k} в состояние $\mathbf{k} + \mathbf{e}_2$, если $k_1 \leq N - 1$ и $k_2 = 0$, где $\mathbf{e}_2 = (0, 1)$. Интенсивность перехода при поступлении нэл-заявки и эл-заявки равна соответственно λ_1 и λ_2 .

При уходе нэл-заявки из системы в состоянии \mathbf{k} происходит переход в состояние $\mathbf{k} - \mathbf{e}_1$, а уход эл-заявки в состоянии \mathbf{k} порождает переход в состояние $\mathbf{k} - \mathbf{e}_2$. Интенсивность перехода при уходе нэл-заявки и эл-заявки в состоянии \mathbf{k} равна соответственно $k_1\mu$ и $(N - k_1)\mu$.

Таким образом, элементы производящей матрицы двумерной марковской цепи, описывающей функционирование данной системы, определяются так:

$$q(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \begin{cases} \lambda_1, & \text{если } k_1 \leq N - 1, k_2 = 0 \text{ или } k_1 \leq N - 2, k_2 = 1, \mathbf{k}' = \mathbf{k} + \mathbf{e}_1, \\ \lambda_2, & \text{если } k_1 \leq N - 1, k_2 = 0, \mathbf{k}' = \mathbf{k} + \mathbf{e}_2, \\ k_1\mu, & \text{если } \mathbf{k}' = \mathbf{k} - \mathbf{e}_1, \\ (N - k_1)\mu, & \text{если } \mathbf{k}' = \mathbf{k} - \mathbf{e}_2, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

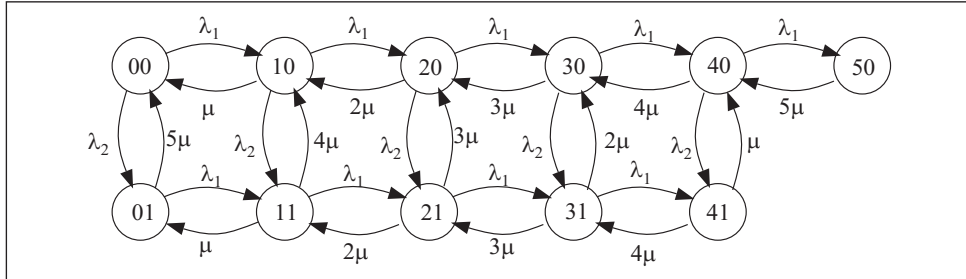


Рис. 1. Граф переходов между состояниями модели с равноправным доступом для заявок обоих типов, $N = 5$

Граф переходов между состояниями модели показан на рис. 1. Стационарное распределение $(p(\mathbf{k}):\mathbf{k} \in S)$ данной модели находим из соответствующей системы балансовых уравнений (СБУ), составленной на основе соотношений (2):

для состояний $\mathbf{k} \neq (N, 0)$ и $\mathbf{k} \neq (N-1, 1)$

$$(\lambda_1 + \lambda_1(1 - \delta(k_2, 0)) + N\mu)p(\mathbf{k}) = \lambda_1 p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_1)(1 - \delta(k_1, 0)) + \lambda_2 p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_2)\delta(k_2, 0) + (k_1 + 1)\mu p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_1) + (N - k_1)\mu p(\mathbf{k} + \mathbf{e}_2)\delta(k_2, 0); \quad (3)$$

для состояния $\mathbf{k} = (N, 0)$

$$N\mu p(\mathbf{k}) = \lambda_1 p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_1); \quad (4)$$

для состояния $\mathbf{k} = (N-1, 1)$

$$N\mu p(\mathbf{k}) = \lambda_1 p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_1) + \lambda_2 p(\mathbf{k} - \mathbf{e}_2); \quad (5)$$

Здесь $\delta(x, y)$ — символы Кронеккера,

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y, \\ 0, & x \neq y. \end{cases}$$

Для этой системы уравнений нормирующее условие имеет вид

$$\sum_{\mathbf{k} \in S} p(\mathbf{k}) = 1. \quad (6)$$

Показатели QoS разнотипных заявок в данной модели оцениваем с помощью вероятностей их блокировки $PB_{\text{нэл}}$ и $PB_{\text{эл}}$. Из описания модели видно, что нэл-заявки теряются лишь тогда, когда все каналы системы заняты. Отсюда заключаем, что

$$PB_{\text{нэл}} = p(N, 0) + p(N-1, 1). \quad (7)$$

Эластичная заявка теряется, если в момент ее поступления либо все каналы системы заняты нэл-заявками, либо в этот момент в системе уже обслуживается одна эл-заявка. Отсюда делаем вывод, что вероятность потери эл-заявок определяется так:

$$PB_{эл} = p(N, 0) + \sum_{i=0}^{N-1} p(i, 1). \quad (8)$$

Другая характеристика данной модели — среднее число занятых каналов \tilde{N} также определяется через ее стационарное распределение:

$$\tilde{N} = N \sum_{i=0}^{N-1} p(i, 1) + \sum_{i=1}^N ip(i, 0). \quad (9)$$

Следовательно, для нахождения характеристик (7)—(9) необходимо определить стационарное распределение ($p(\mathbf{k}):\mathbf{k} \in S$). Однако, нахождение стационарного распределения модели с помощью СБУ (3)—(6) при больших значениях N связано с определенными вычислительными трудностями, так как указанная система уравнений не имеет мультипликативного решения. Для доказательства последнего факта можно использовать известный критерий Колмогорова для двумерных цепей Маркова [15, с. 185—186].

Рассмотрим фрагмент графа, показанного на рис.1. Выберем четыре соседних состояния (рис. 2). В качестве начального состояния выберем одно из них. Пусть для определенности изложения это состояние (1, 0). Тогда, начиная с этого состояния вычисляются произведения соответствующих интенсивностей переходов: по часовой стрелке — $\lambda_1 \lambda_2 2\mu 4\mu$, против часовой стрелки — $\lambda_2 \lambda_1 3\mu 2\mu$. Как видим, эти величины не равны между собой, т.е. в сети существует ненулевая циркуляция, что означает отсутствие мультипликативного решения разработанной выше СБУ (3)—(6). Поэтому возникает необходимость в разработке приближенного метода расчета стационарного распределения данной модели. Для этого используем подход, предложенный в работе [14].

Предположим, что интенсивность трафика одного типа существенно превосходит соответствующий показатель другого трафика и что $\lambda_1 \gg \lambda_2$ (если выполняется условие $\lambda_1 \ll \lambda_2$, то описанная ниже процедура модифицируется известным способом).

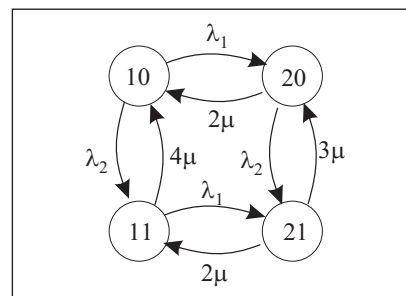


Рис. 2. Фрагмент графа модели

Рассмотрим следующее разбиение ФПС (1): $S = S_0 \cup S_1$, $S_0 \cap S_1 = \emptyset$, где $S_r := \{\mathbf{k} \in S, k_2 = r\}$, $r = 0, 1$, т. е. осуществляется разбиение по строкам (см. рис. 1). Стационарное распределение внутри классов S_0 и S_1 совпадает с распределениями классической системы Эрланга $M/M/N/0$ и $M/M/N-1/0$ с нагрузкой ν_1 эрл, где $\nu_1 := \lambda_1 / \mu$. Для краткости изложения этих распределений обозначим соответственно $\theta_0(i)$, $i = \overline{0, N}$ и $\theta_1(j)$, $j = \overline{0, N-1}$,

$$\theta_0(i) = \frac{\nu_1^i}{i!} \left(\sum_{r=0}^N \frac{\nu_1^r}{r!} \right)^{-1}, \quad i = \overline{0, N}; \quad (10)$$

$$\theta_1(j) = \frac{\nu_1^j}{j!} \left(\sum_{r=0}^{N-1} \frac{\nu_1^r}{r!} \right)^{-1}, \quad j = \overline{0, N-1}. \quad (11)$$

Следовательно, с учетом (2) и (10), (11) интенсивности переходов между двумя укрупненными состояниями $\langle 0 \rangle$ и $\langle 1 \rangle$ (которые соответствуют классам состояний S_0 и S_1) определяются так:

$$q(\langle r \rangle, \langle r' \rangle) = \begin{cases} \lambda_2(1 - E_B(\nu_1, N)), & \text{если } r = 0, r' = 1, \\ \mu \sum_{i=0}^{N-1} (N-i) \theta_1(i), & \text{если } r = 1, r' = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $E_B(\nu_1, N)$ — B -формула Эрланга, $E_B(\nu, N) = \frac{\nu^N}{N!} \left(\sum_{r=0}^N \frac{\nu^r}{r!} \right)^{-1}$. Тогда из (12)

находим стационарные вероятности укрупненных состояний $\langle 0 \rangle$ и $\langle 1 \rangle$:

$$\pi(\langle 0 \rangle) = \frac{q(\langle 1 \rangle, \langle 0 \rangle)}{q(\langle 1 \rangle, \langle 0 \rangle) + q(\langle 0 \rangle, \langle 1 \rangle)}; \quad (13)$$

$$\pi(\langle 1 \rangle) = \frac{q(\langle 0 \rangle, \langle 1 \rangle)}{q(\langle 1 \rangle, \langle 0 \rangle) + q(\langle 0 \rangle, \langle 1 \rangle)}. \quad (14)$$

Стационарное распределение исходной модели приближенно имеет вид

$$p(i, j) \approx \theta_j(i) \pi(\langle j \rangle), \quad (i, j) \in S. \quad (15)$$

С учетом (10)—(15) показатели QoS модели (7)—(9) приближенно определяются так:

$$PB_{\text{нэл}} \approx E_B(\nu_1, N) \pi(\langle 0 \rangle) + E_B(\nu_1, N-1) \pi(\langle 1 \rangle);$$

$$PB_{\text{эл}} \approx E_B(\nu_1, N) \pi(\langle 0 \rangle) + \pi(\langle 1 \rangle); \quad \tilde{N} \approx N \pi(\langle 1 \rangle) + \sum_{r=1}^N r \theta_0(r) \pi(\langle 0 \rangle).$$

Модель с ограниченным доступом для нэл-заявок. Сделаем обобщение исследованной выше модели. Предположим, что обслуживание эл-заявки может начинаться лишь тогда, когда число свободных каналов не меньше $R \geq 1$, т. е. обслуживание эл-заявки со скоростью ниже $R\mu$ приводит к существенному ухудшению качества их передачи.

В обобщенной модели состояние системы в произвольный момент времени также описывается двумерным вектором $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$, где k_1 (k_2) — число нэл-заявок (эл-заявок) в системе, $k_1 = 0, 1, 2, \dots, N$; $k_2 = 0, 1$. Фазовое пространство состояний модели (S^*) является подмножеством множества (1) и определяется из выражения $S^* := S \setminus \{\mathbf{k} \in S : k_1 \geq N - R + 1, k_2 = 1\}$, из которого следует, что ФПС обобщенной модели не содержит состояния типа $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$, где $k_1 \geq N - R + 1, k_2 = 1$. Это означает, что если система находится в состоянии $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$, в котором $k_2 = 1$ и $k_1 = N - R$, то поступившая нэл-заявка не принимается для обслуживания, так как в противном случае скорость обслуживания эл-заявки была бы меньше, чем $R\mu$, что не допускается из-за ухудшения качества обслуживания эл-заявки. Следовательно, в данной модели вводится ограничение для доступа нэл-заявок в каналы.

Замечание 1. В случае $R = 1$ из данной модели получается модель, описанная выше.

Интенсивности переходов между состояниями обобщенной модели определяются аналогично (2) с соответствующими изменениями. Граф переходов между состояниями обобщенной модели показан на рис. 3.

Систему балансовых уравнений для стационарного распределения обобщенной модели ($p^*(\mathbf{k}) : \mathbf{k} \in S^*$) составляем аналогично (3)—(6). Характеристики обобщенной модели, т. е. вероятности потери нэл- и эл-заявок и среднее число занятых каналов \tilde{N}^* определяем аналогично (7) — (9):

$$\begin{aligned} PB_{\text{нэл}}^* &= p^*(N, 0) + p^*(N - R, 1); \\ PB_{\text{эл}}^* &= \sum_{i=0}^{N-R} p^*(i, 1) + \sum_{i=N-R+1}^N p^*(i, 0); \\ \tilde{N}^* &= N \sum_{i=0}^{N-R} p^*(i, 1) + \sum_{i=1}^N i p^*(i, 0). \end{aligned} \quad (16)$$

С помощью известного критерия Колмогорова [15] здесь также можно показать, что соответствующая СБУ для данной модели не имеет стационарного распределения мультипликативного вида. Поэтому необходимо разработать эффективную вычислительную процедуру для нахождения характеристик (16).

Применяя описанный выше подход можно предложить следующий алгоритм для приближенного расчета указанных характеристик.

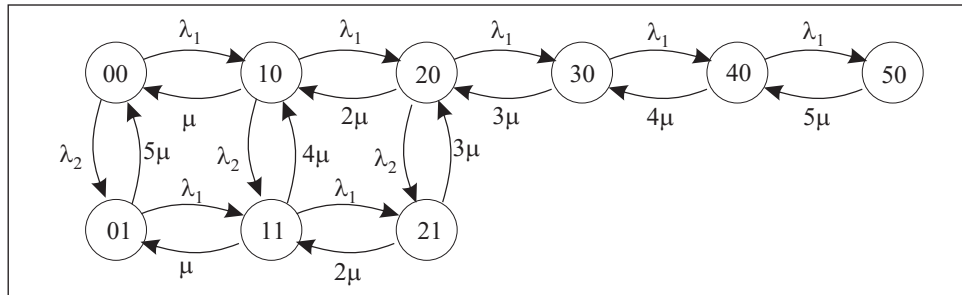


Рис. 3. Граф переходов между состояниями модели с ограниченным доступом для нэл-заявок $N = 5, R = 3$

Шаг 1. Вычислить

$$\pi^*(<0>) = \frac{q^*(<1>, <0>)}{q^*(<1>, <0>) + q^*(<0>, <1>)};$$

$$\pi^*(<1>) = \frac{q^*(<0>, <1>)}{q^*(<1>, <0>) + q^*(<0>, <1>)},$$

где

$$q^*(<i>, <i'>) = \begin{cases} \lambda_2 \sum_{j=0}^{N-R} \theta_0(j), & \text{если } i=0, i'=1, \\ \mu \sum_{j=0}^{N-R} (N-j) \theta_1(j), & \text{если } i=1, i'=0. \end{cases}$$

Величины $\theta_0(j)$ вычисляем согласно (10), величины $\theta_1(j)$ — согласно (11), но в последней формуле верхний предел суммирования заменяем величиной $N-R$.

Шаг 2. Вычислить

$$PB_{\text{нэл}}^* \approx E_B(v_1, N) \pi^*(<0>) + E_B(v_1, N-R) \pi^*(<1>);$$

$$PB_{\text{эл}}^* \approx \pi^*(<1>) + \sum_{i=N-R+1}^N \theta_0(i) \pi^*(<0>);$$

$$\tilde{N}^* \approx N \pi^*(<1>) + \sum_{i=1}^N \theta_0(i) \pi^*(<0>).$$

Замечание 2. С помощью данного алгоритма в случае $R=1$ можно получить формулы для расчета модели с равноправным доступом для заявок обоих типов (см. замечание 1).

Результаты численных экспериментов. На основе предложенных алгоритмов расчета моделей MRQ с одной эл-заявкой на обслуживании разработаны соответствующие вычислительные программы, с помощью которых выполнены численные эксперименты. Поскольку модели с равноправным доступом являются частными случаями моделей с ограниченным доступом для нэл-заявок, для краткости изложения приведем результаты численных экспериментов лишь для моделей последнего типа.

Относительно поведения функций вероятностей потерь разнотипных заявок и среднего числа занятых каналов при изменении общего числа каналов заметим, что, как и следовало ожидать, вероятности потерь являются монотонно убывающими, а среднее число занятых каналов монотонно возрастающей функцией. Поэтому на рис. 4 показаны только графики зависимостей вероятностей потерь и среднее число занятых каналов от параметра R . При этом общее число каналов и нагрузки трафиков считаются фиксированными.

Относительно теоретических ожиданий характера изменения изучаемых величин заметим, что, с одной стороны, при возрастании параметра R уменьшаются шансы доступа эл-заявок к каналам обслуживания, т. е. следует ожидать, что функция вероятности потери эл-заявок должна быть монотонно возрастающей относительно аргумента R . С другой стороны, с возрастанием параметра R уменьшаются также шансы нэл-заявок быть принятыми для обслуживания, так как при увеличении параметра R нэл-заявки реже могут использовать каналы, занятые обслуживанием эл-заявок. Таким образом следует ожидать, что функция вероятности потери нэл-заявок является монотонно возрастающей относительно аргумента R .

Среднее число занятых каналов существенным образом зависит от нагрузочных параметров входящих трафиков. Вместе с тем, можно заметить, что с возрастанием аргумента R уменьшается число состояний типа $(j, 1)$ (так как их максимальное число равно $N - R$), и, следовательно, увеличивается вероятность того, что система находится в таких состояниях. Таким образом, при возрастании аргумента R также увеличивается среднее число занятых каналов.

Результаты многочисленных экспериментов полностью подтвердили все теоретические ожидания, что позволяет сделать следующие выводы.

1. Вероятность потери нэл-заявок является возрастающей функцией нагрузки эл-заявок при фиксированных значениях всех остальных параметров модели (см. рис. 4, *a*). Скорость изменения этой функции существенно зависит от значения R . Так, например, при значениях нагрузки эл-заявок, равных 0,1 и 0,01, значения вероятностей потерь почти одинаковы при любых значениях R ($R \leq 8$), а именно: при $R = 8$ соответствующие значения указанной функции равны $6,3 \cdot 10^{-12}$ и $1,1 \cdot 10^{-12}$; при $9 \leq R \leq 39$ отно-

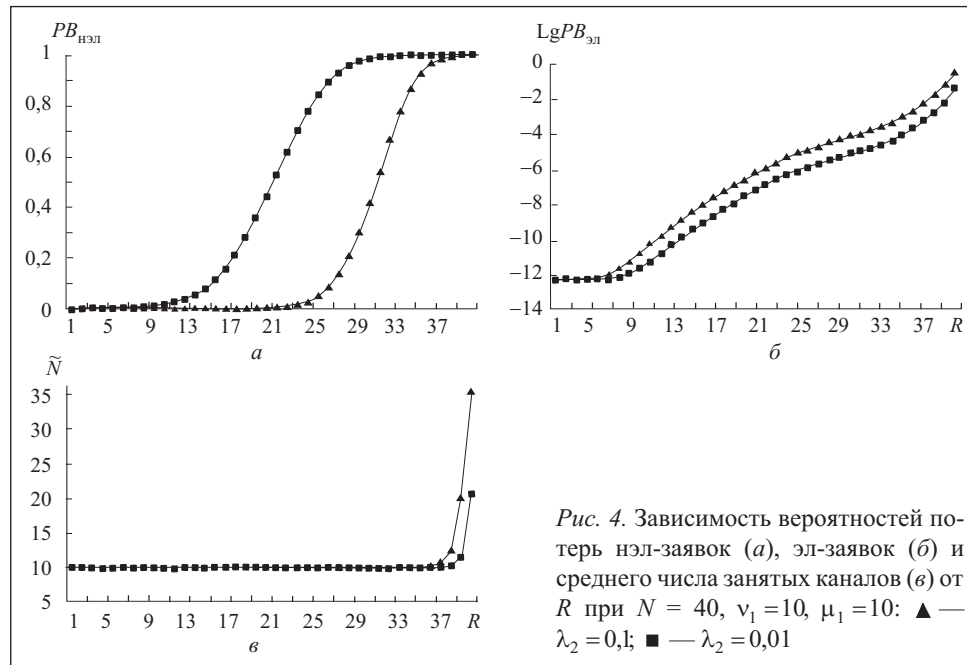


Рис. 4. Зависимость вероятностей потерь нэл-заявок (а), эл-заявок (б) и среднего числа занятых каналов (в) от R при $N = 40$, $\nu_1 = 10$, $\mu_1 = 10$: \blacktriangle — $\lambda_2 = 0,1$; \blacksquare — $\lambda_2 = 0,01$

шение соответствующих значений этой функции приблизительно равно 10 (например, при $R=9$ указанные значения равны $1,8 \cdot 10^{-11}$ и $2,3 \cdot 10^{-12}$, а при $R=39$ соответствующие значения равны $3,1 \cdot 10^{-1}$ и $4,4 \cdot 10^{-2}$). При максимально возможном значении $R=40$ значения вероятностей потерь при указанных нагрузках эл-заявок равны $8,4 \cdot 10^{-1}$ и $3,5 \cdot 10^{-1}$, т. е. их отношение приблизительно равно 2,4.

2. Вероятность потери эл-заявок относительно изменения их числа аналогична функции вероятности потери нэл-заявок (см. рис. 4, б).

3. Среднее число занятых каналов не существенно зависит от значения нагрузки эл-заявок (см. рис. 4, в). Так, например, при 10-кратном увеличении нагрузки эл-заявок значение данной функции почти не изменяется; для выбранных значений параметров модели оно приблизительно равно 10 при $1 \leq R \leq 38$. Лишь при экстремальных значениях $R=39$ и $R=40$, значения этой функции равны 20,16 и 35,39 при $\lambda_2 = 0,1$ и 11,46 и 20,65 при $\lambda_2 = 0,01$.

Вывод. Предложенные алгоритмы расчета характеристик многоскоростных систем обслуживания, в которых осуществляется совместное обслуживание неэластичных и эластичных заявок, позволяют изучить поведение характеристик исследуемых моделей в любом диапазоне изменения значений структурных и нагрузочных параметров моделей, а в дальнейшем решать задачи их оптимизации.

Research results are considered for models of multirate queuing systems for non-elasticly and elasticly calls. It is supposed that non elasticly calls require $b > 1$ system channels simultaneously in an full operation period and the channels start and end one non-elasticly call handling simultaneously. The models in which single elasticly call seizes all free channels are considered. At that in any time in channels might be handle at most one elasticly call. Two kinds of models are examined in more detail: with the same chance to access for both type of calls and with restricted access for non-elasticly calls. Effective numerical algorithms for calculate the model characteristics are proposed. The results of computational experiments are given.

1. *Ross K. W.* Multiservice loss models for broadband telecommunications networks. — N.Y. : Springer-Verlag, 1995. — 165 p.
2. *Schwartz M.* Broadband integrated networks. — N.Y. : Prentice-Hall, 1996. — 347 p.
3. *Gazdziki P., Lambadaris I., Mazumdar R.* Blocking probabilities for large multirate Erlang loss system // *Adv. Appl. Prob.* — 1993. — Vol. 25. — P. 997—1009.
4. *Mitra D., Morrison J. A., Ramakrishnan.* ATM network design and optimization: a multirate loss network framework // *IEEE/ACM Trans. Networking.* — 1996. — Vol. 4. — P. 531—543.
5. *Melikov A.Z., Deniz D.Z.* Non-exhaustive channel accesses strategy in multi-resource communication systems with non-homogeneous traffic // *Proc. 5th IEEE Symposium on Computers and Communications, July 3-6, 2000, Antibes — Juan Les Pins. — France : IEEE Computer Society Printing House.* — P. 432—437.
6. *Меликов А. З., Фаттахова М. И., Казиев Т. С.* Метод исследования характеристик многоскоростных сетей обслуживания с одним ресурсом и потерями // *Электрон. моделирование.* — 2005. — 27, № 4. — С. 35—45.
7. *Меликов А. З., Фаттахова М. И., Казиев Т. С.* Анализ и оптимизация много-скоростной системы обслуживания со стратегией резервирования каналов // *Там же.* — 2006. — 28, № 5. — С. 73—85.
8. *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11.* Generic coding of moving pictures and associated audio information. ISO/IEC International Standard 13818, Nov. 1994.
9. *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11.* JPEG2000 Part 1 final committees draft version 1, ISO/IEC International Standard N1646, Mar. 2000.
10. *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11.* Overview of the MPEG-4 standard, ISO/IEC International Standard N3747, Oct. 2000.
11. *Chen H., Huang L., Kumar S., Kuo J. C.* Radio resource management for multimedia QoS support in wireless networks. — N.Y. : Kluwer Academic Publishers, 2004. — 256 p.
12. *Zhang Y., Soong B.-H.* Performance evaluation of GSM/GPRS networks with channel re-allocation scheme // *IEEE Communications Letters.* — 2004. — Vol. 8, № 5. — P. 280—282.
13. *Zhang Y., Soong B.-H., Ma M.* A dynamic channel assignment scheme for voice/data integration in GPRS networks // *Computer Communications.* — 2006. — Vol. 29, № 8. — P. 1163—1173.
14. *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, № 9. — P. 1386—1392.
15. *ITU-D, Study Group 2, Question 16/2.* Handbook «Teletraffic Engineering». Geneva, Jan. 2005.

Поступила 08.12.06;
после доработки 26.11.07

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

НАГИЕВ Фуад Надир оглы, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та кибернетики НАН Азербайджана. В 2001 г. окончил магистратуру Бакинского госуниверситета. Область научных исследований — компьютерные сети, теория сетей массового обслуживания.

КАЗИЕВ Теймур Сергеевич — канд. техн. наук, науч. сотр. Ин-та кибернетики НАН Азербайджана. В 2003 г. окончил магистратуру Бакинского госуниверситета. Область научных исследований — моделирование коммуникационных сетей, анализ и оптимизация систем и сетей массового обслуживания.