

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРИОРИТЕТАМИ

### Введение

В высокоскоростных мультимедийных сетях связи для удовлетворения заданных уровней качества обслуживания (Quality of Service, QoS) разнотипных заявок используются приоритеты различных типов. Приоритеты, определяющие процедуры принятия в буфер разнотипных заявок, называются пространственными, а приоритеты, задающие правила выбора заявки определенного типа из буфера, — временными. Пространственные приоритеты позволяют, главным образом, управлять интенсивностями (вероятностями) потери разнотипных заявок, в то время как временные существенно образом влияют на время их задержки (ожидания) в буфере.

В классических схемах приоритетного обслуживания, как правило, предполагается, что заявки определенного типа обладают одновременно высокими (по сравнению с заявками другого типа) пространственными и временными приоритетами [1]. Вместе с тем известны работы, в которых изучаются системы с различными уровнями пространственных и временных приоритетов [2–4]. В последние годы также интенсивно исследуются системы со скачкообразными приоритетами, где низкоприоритетные заявки мгновенно переводятся в очередь высокоприоритетных [5–7].

Следует отметить, что, несмотря на простоту практической реализации, статические приоритеты любых типов не позволяют должным образом учитывать ограничения на время пребывания заявок в системе (или на время их ожидания в очереди). Поэтому зачастую в реальных системах обслуживания целесообразно в качестве временных приоритетов использовать динамические, изменяющиеся с течением времени. Исследование динамических приоритетов, зависящих от времени, особенно актуально при организации обслуживания заявок с ограниченным временем ожидания, а также в системах с конечным временем старения заявок.

В системах с динамическими приоритетами решение об определении типа заявки, выбираемой на обслуживание, зависит от значения некоторой функции  $J_i(t)$ , определяющей мгновенный приоритетный индекс заявки  $i$ -го типа в момент  $t$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  — общее количество типов заявок. Эту функцию аналитически можно определить различными способами. Функция мультипликативного характера  $J_i(t) = b_i \tau_i(t)$  определена в работе [8], где  $b_i$  — некоторый коэффициент, определяющий скорость изменения приоритетности заявки  $i$ -го типа при ее ожидании в очереди;  $\tau_i(t)$  — случайное время ожидания заявки  $i$ -го типа от момента поступления до текущего момента  $t$ .

Одним из факторов, сдерживающих широкое применение динамических приоритетов, является отсутствие методики определения коэффициентов  $b_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , в указанной выше формуле функции приоритетности  $J_i(t)$ . Вместе с тем именно за счет надлежащего выбора этих коэффициентов можно повысить эффективность функционирования системы относительно выбранного критерия качества. Исходя из этого в работе предложен метод решения задачи выбора оптимальных значений указанных коэффициентов, минимизирующих суммарное

© А.З. МЕЛИКОВ, Л.А. ПОНОМАРЕНКО, Б.Г. ИСМАЙЛОВ, 2015

значение длины очереди в системах разнотипных заявок. В целях проверки адекватности полученных результатов и подробного анализа характеристик динамических приоритетов в системе обслуживания разнотипных заявок, для различных значений и законов распределения входных и выходных параметров целесообразно применение имитационного моделирования. Поэтому в работе построены имитационные модели изучаемой системы обслуживания с динамическими приоритетами на языке GPSS (General Purpose Simulation System).

### 1. Описание математической модели системы обслуживания с динамическими приоритетами разнотипных заявок

Рассматривается система  $M_n/M_n/1/\infty$ , в которой на обслуживание поступают  $n > 1$  пуассоновских потоков заявок, и при этом интенсивность  $i$ -го потока равна  $\lambda_i$ , а время обслуживания заявок этого типа имеет экспоненциальное распределение со средним значением  $\mu_i^{-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Приоритеты обслуживания заявок изменяются в зависимости от длительности их ожидания в очереди, т.е. выбор типа заявки для обслуживания осуществляется с учетом текущего значения функции приоритетности  $J_i(t) = b_i \tau_i(t)$ , зависящей для каждой заявки от времени ее ожидания в очереди. При этом обслуживание заявок осуществляется в порядке относительного приоритета, т.е. в момент освобождения канала на обслуживание из буферной памяти поступает заявка, обладающая в данный момент максимальным значением функции приоритетности  $J_i(t)$ .

Здесь рассматриваются относительные приоритеты при линейно возрастающей и линейно убывающей функции приоритетности заявок в системе.

**1.1. Динамические приоритеты при линейно возрастающей функции приоритетности заявок.** В этом случае в выражении функции приоритетности  $J_i(t)$  коэффициенты  $b_i$ , определяющие скорость изменения приоритетности разнотипных заявок при их ожидании в очереди, являются положительными величинами,  $b_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$ . Если при использовании приоритетов данного типа в момент  $T_i$  поступила заявка  $i$ -го типа, а в момент  $T_k$  — заявка  $k$ -го типа,  $T_k > T_i$ , и при этом выполняется неравенство  $b_k > b_i$ , то до момента  $T_{ik} = (b_k T_k - b_i T_i) / (b_k - b_i)$  более высоким приоритетом обладает заявка  $i$ -го типа. При  $t > T_{ik}$  заявка  $k$ -го типа имеет более высокий приоритет, несмотря на то что она находится в очереди меньше времени, чем заявка  $i$ -го типа. Это означает, что если канал освободится от обслуживания некоторой заявки до момента  $T_{ik}$ , то на обслуживание принимается заявка  $i$ -го типа; в противном случае на обслуживание первой поступит заявка  $k$ -го типа. Таким образом, при такой процедуре обслуживания даже заявки с малым коэффициентом  $b_i$  при достаточно больших значениях их времени ожидания в очереди могут получить преимущество при обслуживании перед всеми другими типами заявок.

При  $\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i < 1$ ,  $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$ , в системе существует стационарный режим, и в таком режиме среднее время ожидания в очереди заявок  $i$ -го типа определяется так [8]:

$$\tau_i = \frac{\tau_0 / (1 - \rho) - \sum_{j=i+1}^n \rho_j \tau_j (1 - b_j / b_i)}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j (1 - b_i / b_j)}, \quad (1)$$

где  $\tau_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_i^2 (1 + \upsilon_i^2)$  — среднее время ожидания завершения обслуживания одной заявки,  $\upsilon_i$  — коэффициент вариации времени обслуживания заявок  $i$ -го приоритета.

Из формулы (1) видно, что зависимость  $\tau_i$  от  $b_i$  определяется только отношениями этих параметров, а не их собственными значениями,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

**1.2. Динамические приоритеты при линейно убывающей функции приоритетности заявок.** В этом случае функция приоритетности заявок линейно убывает при их ожидании в очереди, т.е. коэффициенты, определяющие скорость убывания приоритетности заявок, являются отрицательными величинами,  $b_i < 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В этом случае выбор заявки из очереди осуществляется так, чтобы на обслуживание поступила заявка, для которой в момент освобождения канала функция приоритетности имеет максимальное значение. При этом время ожидания в очереди заявок  $i$ -го типа определяется так [8]:

$$\tau_i = \frac{\tau_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j \tau_j \left(1 - \frac{b_j}{b_i}\right)}{1 - \sum_{j=1}^i \rho_j - \sum_{j=i+1}^n \rho_j \frac{b_i}{b_j}}. \quad (2)$$

Как и в предыдущем случае, значения  $\tau_i$  зависят лишь от отношения параметров  $b_i$ .

## 2. Постановка и решение задачи

Здесь рассматривается задача выбора оптимальных значений коэффициентов  $b_i$  для двух типов заявок ( $n = 2$ ). При этом в качестве критерия оптимальности выбирается суммарная длина очереди разнотипных заявок. Иными словами, требуется найти такие (оптимальные) значения  $b_i^*$ ,  $i = 1, 2$ , чтобы суммарная длина очереди была минимальной при заданных ограничениях на время ожидания заявок каждого типа. Математически эта задача записывается так:

$$L_q = \lambda_1 \tau_1 + \lambda_2 \tau_2 \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях

$$\tau_1 \leq \tau_1^*, \quad (4)$$

$$\tau_2 \leq \tau_2^*, \quad (5)$$

где  $\tau_1^*$  и  $\tau_2^*$  — известные величины.

Для случая  $b_i > 0$ ,  $i = 1, 2$ , задача (3)–(5) в явном виде записывается так:

$$L_q = \frac{\tau_0}{1 - \rho} \times \frac{(\lambda_1 - \rho \lambda_1 + \lambda_2) b_1 + \rho \lambda_1 b_2}{(1 - \rho_1) b_1 + \rho_1 b_2} \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничениях

$$\frac{\tau_0}{1 - \rho} \times \frac{(1 - \rho) b_1 + \rho b_2}{(1 - \rho_1) b_1 + \rho_1 b_2} \leq \tau_1^*, \quad (7)$$

$$\frac{\tau_0}{1-\rho} \times \frac{b_1}{(1-\rho_1)b_1 + \rho_1 b_2} \leq \tau_2^*. \quad (8)$$

Для случая  $b_i < 0$ ,  $i = 1, 2$ , задача (3)–(5) имеет следующий вид:

$$L_q = \frac{\tau_0}{1-\rho} \times \frac{(\lambda_1 - \rho\lambda_1 + \lambda_2)b_2 - (\rho_2\lambda_2 + \rho_1\lambda_2)b_1}{(1-\rho_1)b_2 - \rho_2 b_1} \rightarrow \min \quad (9)$$

при ограничениях

$$\frac{\tau_0 b_2}{(1-\rho_1)b_2 - \rho_2 b_1} \leq \tau_1^*, \quad (10)$$

$$\frac{\tau_0}{1-\rho} \times \frac{b_2 - (\rho_2 - \rho_1)b_1}{(1-\rho_1)b_2 - \rho_2 b_1} \leq \tau_2^*. \quad (11)$$

Задачи (6)–(8) и (9)–(11) являются задачами дробно-линейного программирования (ДЛП). С использованием соответствующих методов эти задачи могут быть сведены к основной задаче линейного программирования (ОЗЛП). С этой целью вводятся новые переменные  $x_j = x_0 b_j$ ,  $y_j = y_0 b_j$ ,  $i = 1, 2$ , следующим образом:

$$x_0 = [(1-\rho)[(1-\rho_1)b_1 + \rho_1 b_2]]^{-1}, \quad y_0 = [(1-\rho)[(1-\rho_1)b_2 - \rho_2 b_1]]^{-1}.$$

Тогда задача (6)–(8) записывается в форме ОЗЛП:

$$L_q = -\tau_0[(\lambda_1 - \rho\lambda_1 + \lambda_2)x_1 + \rho\lambda_1 x_2] \rightarrow \max \quad (12)$$

при ограничениях

$$(1-\rho)x_1 + \rho x_2 + x_3 = \frac{\tau_1^*}{\tau_0}, \quad (13)$$

$$x_1 + x_4 = \frac{\tau_2^*}{\tau_0}, \quad (14)$$

$$(1-\rho)((1-\rho_1)x_1 + \rho_2 x_2) = 1, \quad (15)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0. \quad (16)$$

Аналогичным образом задача (9)–(11) сводится к следующей ОЗЛП:

$$L_q = -\tau_0[(\lambda_1 - \rho\lambda_1 + \lambda_2)y_2 - (\lambda_2\rho_2 + \lambda_2\rho_1)y_1] \rightarrow \max \quad (17)$$

при ограничениях

$$(1-\rho)y_2 + y_3 = \frac{\tau_1^*}{\tau_0}, \quad (18)$$

$$y_2 - (\rho_2 - \rho_1)y_1 + y_4 = \frac{\tau_2^*}{\tau_0}, \quad (19)$$

$$(1-\rho)((1-\rho_1)y_2 - \rho_2 y_1) = 1, \quad (20)$$

$$y_1, y_2, y_3, y_4 \geq 0. \quad (21)$$

Решения задач (12)–(16) и (17)–(21) можно получить с применением метода искусственного базиса. При этом расширенная задача для (12)–(16) будет иметь следующий вид:

$$L_q = -\tau_0[(\lambda_1 - \rho\lambda_1 + \lambda_2)x_1 + \rho\lambda_1x_2] - Mx_5 \rightarrow \max \quad (22)$$

при ограничениях

$$(1 - \rho)x_1 + x_2 + x_3 = \frac{\tau_{q1}^*}{\tau_{q0}}, \quad (23)$$

$$x_1 + x_4 = \frac{\tau_2^*}{\tau_0}, \quad (24)$$

$$x_1 + x_2 + x_5 = 1, \quad (25)$$

где  $x_j \geq 0$ ,  $M$  — некоторое достаточно большое положительное число.

Соответствующая расширенная задача для (17)–(21) записывается так:

$$L_q = -\tau_0[(\lambda_1 - \rho\lambda_1 + \lambda_2)y_2 - (\lambda_2\rho_2 + \lambda_2\rho_1)y_1] - My_5 \rightarrow \max \quad (26)$$

при ограничениях

$$(1 - \rho)y_2 + y_3 = \frac{\tau_1^*}{\tau_0}, \quad (27)$$

$$y_2 - (\rho_2 - \rho_1)y_1 + y_4 = \frac{\tau_2^*}{\tau_0}, \quad (28)$$

$$y_1 + y_2 + y_5 = 1, \quad (29)$$

где  $y_j \geq 0$ ,  $j = 1, 2, \dots, 5$ .

### 3. Численные результаты

Для нахождения оптимальных параметров динамических приоритетов при линейно возрастающей и убывающей функции приоритетности выполнены объемные численные эксперименты. Во всех экспериментах исходные данные выбирались следующим образом:

$$\lambda_1 \in \{0,000476; 0,000444; 0,000434; 0,000400; 0,000384\}, \mu_1 \in \{0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8\},$$

$$\lambda_2 \in \{0,000476; 0,000392; 0,000210; 0,000869; 0,000862\}, \mu_2 \in \{0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,09\}.$$

Результаты исследования характера изменения скоростей приоритетности разнотипных заявок в зависимости от изменения значения величин  $\tau_1^*$ ,  $\tau_2^*$  и  $\rho$  (общей нагрузки) при линейно возрастающей и убывающей приоритетности приведены на рис. 1–4.

Отметим, что здесь показаны лишь результаты численных экспериментов, для которых задачи оптимизации имеют оптимальные решения. Очевидно, что при определенных сочетаниях значений нагрузочных параметров системы ( $\rho_1, \rho_2$ ) и верхних границ для среднего времени ожидания в очереди разнотипных заявок ( $\tau_1^*, \tau_2^*$ ) соответствующие задачи оптимизации не будут иметь решения.

Анализ результатов многочисленных экспериментов для модели с возрастающими функциями приоритетности показывает, что с ростом  $\tau_2^*$  уменьшается

значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, а), с ростом  $\tau_1^*$  увеличивается значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, б), а с ростом общей нагрузки уменьшается значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, в).

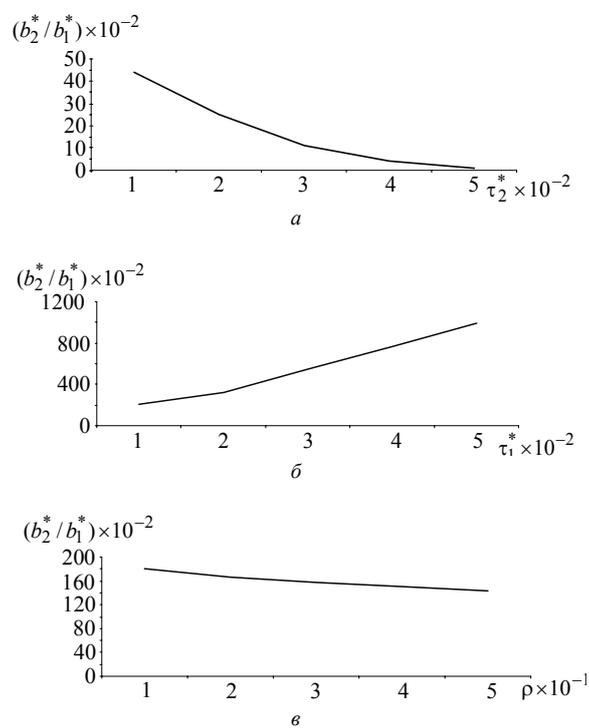


Рис. 1

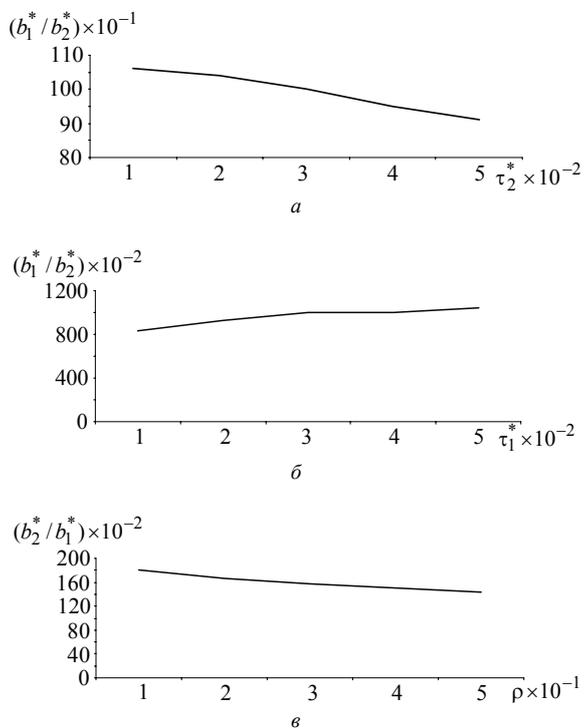


Рис. 2

Отметим, что здесь показаны лишь результаты численных экспериментов, для которых задачи оптимизации имеют оптимальные решения. Очевидно, что при определенных сочетаниях значений нагрузочных параметров системы  $(\rho_1, \rho_2)$  и верхних границ для среднего времени ожидания в очереди разнотипных заявок  $(\tau_1^*, \tau_2^*)$  соответствующие задачи оптимизации не будут иметь решения.

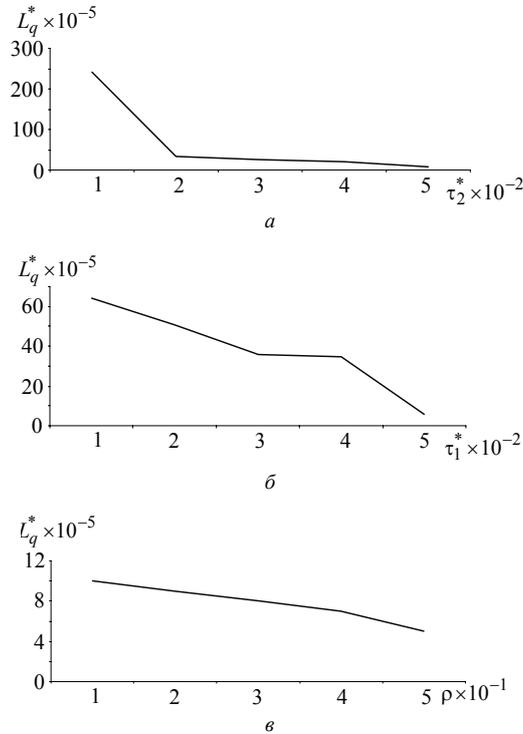


Рис. 3

Анализ результатов многочисленных экспериментов для модели с возрастающими функциями приоритетности показывает, что с ростом  $\tau_2^*$  уменьшается значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, а), с ростом  $\tau_1^*$  увеличивается значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, б), а с ростом общей нагрузки уменьшается значение соотношения  $b_2^*/b_1^*$  (рис. 1, в).

Анализ соответствующих результатов для модели с убывающими функциями приоритетности показывает, что с ростом  $\tau_2^*$  уменьшается значение соотношения  $b_1^*/b_2^*$  (рис. 2, а), с ростом  $\tau_1^*$  увеличивается значение соотношений  $b_1^*/b_2^*$  (рис. 2, б), а с ростом общей нагрузки уменьшается значение соотношения  $b_1^*/b_2^*$  (рис. 2, в). Кроме того, скорости изменения значений величины  $b_2^*/b_1^*$ ,  $b_1^*/b_2^*$  существенным образом отличаются друг от друга при возрастающей и убывающей функции приоритетности при изменении  $\tau_1^*$  и  $\tau_2^*$  (см. рис. 1, а, б, рис. 2, а, б). Вместе с тем для обеих функций приоритетности скорость изменения соотношений  $b_2^*/b_1^*$ ,  $b_1^*/b_2^*$  является почти одинаковой (см. рис. 1, в, рис. 2, в). Следует отметить, что

значение  $L_q^*$  в зависимости от  $\tau_2^*$ ,  $\tau_1^*$ ,  $\rho$  для  $b_i > 0$  (рис. 3, а–в) уменьшается, а для  $b_i < 0$  — увеличивается (рис. 4, а–в).

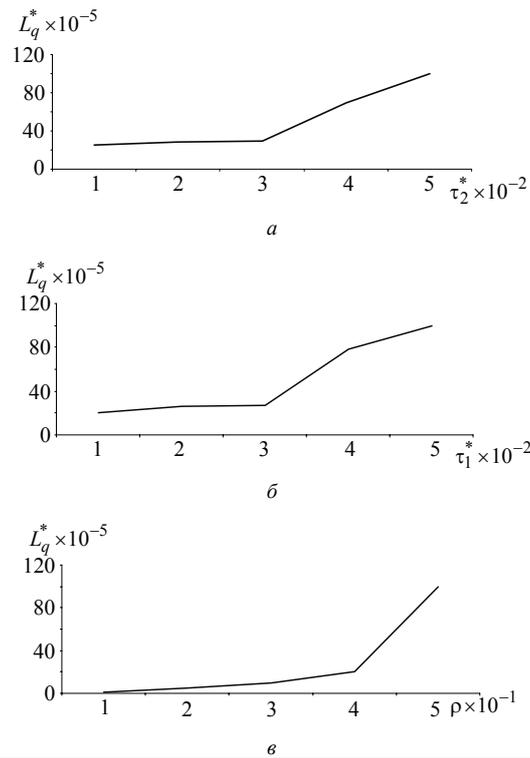


Рис. 4

В целях проверки адекватности аналитических результатов, а также подробного анализа характеристик динамических приоритетов при линейно возрастающей и убывающей функции приоритетности, для различных значений и законов распределения, входных и выходных параметров с учетом их трудоемкости разработана имитационная модель изучаемых систем на языке GPSS.

В модели рассматривается одноканальная система, в которую на обслуживание поступают два пуассоновских входных потока, при этом интенсивность каждого потока и время обслуживания транзактов этого типа имеют экспоненциальное распределение. В модели транзакты образуют неограниченную очередь в буферной памяти. Приоритеты обслуживания транзактов изменяются в зависимости от длительности их ожидания в очереди, т.е. выбор типа транзакта для обслуживания осуществляется с учетом текущего значения приоритетности, зависящей для каждого транзакта от времени его ожидания в очереди. При этом обслуживание транзактов осуществляется в порядке относительного приоритета, т.е. в момент освобождения канала из буферной памяти поступает на обслуживание транзакт, обладающий в данный момент максимальным значением приоритетности. При этом исследуются относительные приоритеты при возрастающем и убывающем значении приоритетности транзактов в системе. Полученные результаты после двух прогонов показаны в приложении.

Следует отметить, что в источниках транзактов, представляющих собой некоторые буферы, в первом случае транзакты упорядочиваются по возрастанию приоритета, а во втором — по убыванию.

Полученные результаты показывают, что при возрастающем и убывающем значении приоритетности транзактов в системе коэффициент использования канала составляет 0,724 и 0,845, а средняя длина очереди — 0,00037 и 0,00043. Среднее время ожидания в очереди с учетом всех транзактов для обоих вариантов является почти одинаковым — 0,052 и 0,049. Отклонение ( $\Delta$ ) результатов аналитического (A) и имитационного (I) моделирования определяется так:  $\Delta = [ |I - A| / A ] \times 100\%$ .

Сравнительный анализ результатов расчетов по аналитической модели с результатами имитации показывает, что они хорошо согласованы, а полученные результаты могут быть использованы в высокоскоростных сетях различного назначения с разнотипными заявками.

### Заключение

В настоящей статье предложены вычислительные процедуры нахождения оптимальных значений параметров динамических приоритетов, зависящих от времени ожидания заявок в очереди. Исследованы динамические приоритеты разнотипных заявок, имеющие мультипликативные виды функции приоритетности. Проведены численные и имитационные эксперименты. Полученные результаты имитационного моделирования подтверждают адекватность численных результатов. Результаты могут быть использованы в высокоскоростных сетях с разнотипными заявками. В настоящее время проводятся исследования по обобщению разработанных процедур решения рассматриваемых проблем для произвольного числа типов заявок.

### Приложение

```

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.1.1
START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES
0.000 354.120 20 1 0
FACILITY ENTRIES UTIL. AVE. TIME AVAIL. OWNER PEND INTER RETRY DELAY
SYSTEM 1 0.724 0.052 1 0 0 0 0 0
USER CHAIN SIZE RETRY AVE.CONT ENTRIES MAX AVE.TIME
LINE 2 0 0.00037 3 3 131.252
CEC XN PRI M1 ASSEM CURRENT NEXT PARAMETER VALUE
4 0 238.769 4 10 4
TSRV 31.225
FEC XN PRI BDT ASSEM CURRENT NEXT PARAMETER VALUE
5 0 379.643 5 0 1
GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.1.2
START TIME END TIME BLOCKS FACILITIES STORAGES
0.000 354.120 20 1 0
FACILITY ENTRIES UTIL. AVE. TIME AVAIL. OWNER PEND INTER RETRY DELAY
SYSTEM 1 0.845 0.049 1 0 0 0 0 0
USER CHAIN SIZE RETRY AVE.CONT ENTRIES MAX AVE.TIME
LINE 2 0 0.00043 3 3 130.155
CEC XN PRI M1 ASSEM CURRENT NEXT PARAMETER VALUE
4 0 240.661 4 10 4
TSRV 32.200
FEC XN PRI BDT ASSEM CURRENT NEXT PARAMETER VALUE
5 0 382.542 5 0 1

```

*А.З. Меліков, Л.А. Пономаренко, Б.Г. Ізмайлов*

## АНАЛІЗ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ З ДИНАМІЧНИМИ ПРІОРИТЕТАМИ

Досліджено систему обслуговування з динамічними пріоритетами, що мають мультиплікативний вигляд функції пріоритетності. Розв'язок задачі мінімізації сумарної довжини черги різнотипних вимог зведено до деякої задачі дробово-лінійного програмування. Побудовано імітаційні моделі досліджуваної системи та проведено експерименти, що підтверджують адекватність числових результатів.

*A.Z. Melikov, L.A. Ponomarenko, B.G. Ismailov*

## ANALYSIS OF QUEUING SYSTEM WITH DYNAMIC PRIORITIES

The queuing system with dynamic priorities which have multiplicative form of priorities function is considered. Solution of the problem of minimizing the total length of the queues of calls of different types is reduced to a problem of fractional-linear programming. The simulation models of the investigated system are developed. The experiments confirming the adequacy of the obtained numerical results are executed.

1. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания (переиздание). — М. : Комкнига. — 2005. — 400 с.
2. *Chao H.J., Peckan I.H.* Queue management with multiple delay and loss priorities for ATM switches // Proc. ICC'94. — 1994. — P. 1184–1189.
3. *Lee Y., Choi B.D.* Queueing system with multiple delay and loss priorities for ATM networks // Information Systems. — 2001. — **138**. — P. 7–29.
4. *Kim C.S., Melikov A.Z., Ponomarenko L.A.* Approximation method for performance analysis of queuing system with multimedia traffics // Applied and Computational Mathematics. — 2007. — **6**, N 2. — P. 218–226.
5. *Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Kim C.S.* Algorithmic approach to analysis of queuing system with finite gueues and jump-like priorities // Journal of Automation and Information Sciences. — 2012. — **44**, N 12. — P. 43–54.
6. *Melikov A.Z., Kim C.S., Ponomarenko L.A.* Approximate method to analysis of queueing models with jump priorities // Automation and Remote Control. — 2013. — **74**, N 1. — P. 62–75.
7. *Melikov A.Z., Kim C.S., Ponomarenko L.A.* Numerical method for analysis of queuing models with priority jumps // Cybernetics and Systems Analysis. — 2013. — **49**, N 1. — P. 55–61.
8. *Клейнрок Л.* Коммуникационные сети. — М. : Наука, 1970. — 256 с.

*Получено 18.05.2015*

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. НАН Украины А.А. Чикирем.