УДК 517.872

АДАПТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БУФЕРА В УЗЛАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Л.А. ПОНОМАРЕНКО, А.З. МЕЛИКОВ, В.Ш. ФЕЙЗИЕВ

Предложены приближенные формулы для вычисления вероятностей потерь разнотипных пакетов в сетях АТМ со стратегией ограниченного частичного распределения буфера. Описан новый подход к решению проблемы расчета характеристик качества данной стратегии, основанный на принципах теории фазового укрупнения состояний соответствующей цепи Маркова. Приведены результаты численных экспериментов, выполненных с использованием полученных аналитических зависимостей.

ВВЕДЕНИЕ

В интегральных сетях коммутации пакетов, базирующихся на АТМ-технологиях *(Asynchronous Transfer Mode)*, обрабатываются разнородные трафики, которые предъявляют различные требования к качеству обслуживания (*Quality of Service* — *QS*). Эти трафики содержат пакеты сообщений реального времени с ограничениями на время задержки (например, видео- и речевая информация), а также пакеты сообщений, не предъявляющие никаких требований ко времени задержки (например, данные, телефакс и т.д.). Для удовлетворения различных требований к качеству обслуживания нужно определить и внедрить в коммутаторах АТМ соответствующую стратегию распределения общего буфера между конфликтующими трафиками реального и не реального времени.

Известны различные стратегии распределения общего буфера в коммутаторах АТМ и методы нахождения показателей *QS* при использовании этих стратегий [1]. Отметим, что известные стратегии можно разделить на два класса: стратегии без вытеснения и стратегии с вытеснением. При использовании стратегии без вытеснения принятому в буфер пакету гарантируется передача по соответствующему исходящему порту, а при использовании стратегии с вытеснением в некоторых случаях новый поступивший пакет может замещать в полностью заполненном буфере пакет другого типа. Известно, что стратегии без вытеснения более просты в реализации, чем стратегии с вытеснением.

Рассмотрим один класс стратегий без вытеснения, введенный в работе [2], причем авторы называли их «ограниченное частичное распределение буфера» (*Limited Partial Buffer Sharing* — *LPBS*). Эти стратегии содержат элементы адаптивности относительно изменения нагрузочных параметров системы, и потому мы использовали для них термин «адаптивная стратегия распределения буфера».

Предложенная стратегия *LPBS* является комбинацией двух известных стратегий — частичного распределения буфера (*Partial Buffer Sharing* —

PBS) [3] и распределения с индивидуальными потолками (*Sharing with Maximum Queue Length — SMXQ*) [4]. Она объединяет достоинства указанных стратегий, так как *PBS* имеет лучшие показатели *QS* в классе стратегий без вытеснения в отношении низкой вероятности потери пакетов (*Cell loss probability — CLP*), а *SMXQ* учитывает ограничения на время задержки пакетов в очереди. Таким образом, цель введения стратегии *LPBS* — максимизация интенсивности обслуженной нагрузки пакетов не реального времени при удовлетворении ограничений на максимальные величины задержки и вероятности потери пакетов реального времени.

В работе [2] показатели *QS* стратегии *LPBS* (т.е. *CLP*) определяются с использованием итеративных процедур решения системы уравнений равновесия (СУР) для стационарных вероятностей состояний. Однако при больших размерах матрицы рассматриваемой системы линейных алгебраических уравнений данный подход оказывается малоэффективным и приводит к большим погрешностям.

В настоящей работе предлагается новый подход к решению рассматриваемой проблемы. Он основан на принципах теории фазового укрупнения состояний стохастических систем [5] и ранее использовался для исследования стратегий *PBS* [6] и *SMXQ* [7–9].

СТРАТЕГИЯ *LPBS*

На вход коммутатора АТМ поступают пакеты не реального и реального времени. Для упрощения изложения назовем пакеты не реального времени пакетами первого типа, а реального — пакетами второго типа. Пакеты обоих типов используют общее буферное пространство коммутатора, размер которого равен B, $0 < B \le +\infty$. В отличие от модели, рассмотренной в работе [2], здесь предполагается, что исходящие порты коммутатора специализированы по типу пакетов, т.е. через i-й порт передаются лишь пакеты i-го типа, $i = 1, 2$.

Процесс поступления пакетов первого типа подчиняется закону Пуассона с параметром λ_1. Пакеты второго типа образуют разрывный пуассоновский процесс *(Interrupted Poisson Process — IPP)*, т.е. имеются альтернирующие *ON*- и *OFF*-периоды, и в *ON*-периодах процесс поступления пакетов второго типа подчиняется закону Пуассона с параметром λ_{ON}, а в *OFF*-периодах пакеты не поступают. Периоды времени *ON* и *OFF* имеют показательное распределение соответственно с параметрами σ_{ON} и σ_{OFF}. Тогда средняя интенсивность поступления пакетов второго типа определяется так:

$$\lambda_2 = \lambda_{ON}\, \sigma_{OFF} \,/(\sigma_{ON} + \sigma_{OFF})\,.$$

Поскольку в АТМ-технологиях все пакеты, независимо от их типа, имеют фиксированную длину (по 53 байта каждый), то время их обслуживания является постоянным. Для i-го исходящего порта это время обозначается как μ_i^{-1}, $i = 1, 2$ (в частном случае возможно $\mu_1 = \mu_2$). Предполагается, что процессы поступления пакетов и их обслуживания — независимы.

Пакет любого типа освобождает место в буфере лишь после полного завершения его передачи, т.е. в период обслуживания в канале он продолжает занимать место в буфере.

Стратегия *LPBS* осуществляется следующим образом. Сначала определяется порог (r) суммарного числа занятых мест в буфере для пакетов первого типа и потолок (т.е. верхняя граница b) для числа пакетов второго типа в буфере. Иными словами, пакеты первого типа принимаются лишь тогда, когда в момент их поступления суммарное число пакетов обоих типов в буфере меньше, чем заданное число r, $0 < r \le B$. В противном случае эти пакеты теряются. Пакеты второго типа принимаются тогда, когда в момент их поступления в буфере есть хотя бы одно свободное место и число пакетов данного типа в буфере меньше, чем заданное число b, $0 < b \le B$.

Замечание 1. Предполагается, что $r + b \ge B$, так как в противном случае часть буфера размером $B - b - r$ осталась бы неиспользованной.

Замечание 2. При использовании стратегии *LPBS* величина максимальной задержки для пакетов второго типа $(D_2^{\max})$ определяется так: $D_2^{\max} = b\mu_2^{-1}$. Иными словами, если величина $D_2^{\max}$ заранее известна, то значение параметра b может быть определено из данного соотношения.

Замечание 3. При $b = B$ такая стратегия совпадает со стратегией *PBS*, а если вдобавок к этому удовлетворяется еще и условие $r = B$, то стратегия *LPBS* совпадает со стратегией *CS (Complete Sharing)* [4].

РАСЧЕТ *CLP* ПРИ СТРАТЕГИИ *PBS*

Исходя из сделанных выше допущений относительно вида функций распределения входящих потоков и времени их обслуживания функционирование системы описывается вложенной цепью Маркова (ЦМ) с состояниями типа $\boldsymbol{n} = (n_1, n_2)$, где n_i — число пакетов i-го типа в системе, $i = 1, 2$. При этом моментами вложения являются моменты ухода заявок из системы.

Фазовое пространство состояний (ФПС) этой ЦМ задается так:

$$E := \left\{ \boldsymbol{n} : n_1 = \overline{0, r},\ n_2 = \overline{0, b},\ n_1 + n_2 \le B \right\}. \tag{1}$$

Элементы производящей матрицы (ПМ) данной ЦМ $q(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}')$, $\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}' \in E$ определяются следующим образом:

$$q(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}') = \begin{cases} \lambda_1, & \text{если} \quad n_1 + n_2 < r, \ \ \boldsymbol{n}' = \boldsymbol{n} + \boldsymbol{e}_1, \\ \lambda_2, & \text{если} \quad n_1 + n_2 < \mathrm{B},\ n_2 < \mathrm{b}, \ \ \boldsymbol{n}' = \boldsymbol{n} + \boldsymbol{e}_1, \\ \mu_i & \text{если} \quad \boldsymbol{n}' = \boldsymbol{n} - \boldsymbol{e}_1, \ \ i = 1, 2, \\ 0 & \text{в остальных случаях}, \end{cases} \tag{2}$$

где $\boldsymbol{e}_1 = (1, 0)$, $\boldsymbol{e}_2 = (0, 1)$.

Искомые вероятности потери пакетов i-го типа при стратегии *LPBS* с параметрами B, r и b обозначаются $CLP_i(B, r, b)$, $i = 1, 2$. Определяются они через стационарное распределение модели $p(\boldsymbol{n})$, $\boldsymbol{n} \in E$:

$$CLR_1(B,r,b) := \sum_{n\in E} p(\boldsymbol{n}) I(n_1+n_2 \ge r), \tag{3}$$

$$CLP_2(B,r,b) := \sum_{n\in E} p(\boldsymbol{n}) I(n_1+n_2 < B,\ n_2 < b), \tag{4}$$

где $I(A)$ — индикаторная функция события A.

Известно, что при использовании стратегии $LPBS$ не существует мультипликативного решения для стационарного распределения, т.е. для определения $CLP_i(B,r,b),\ i=1,2$. Каждый раз при конкретных значениях структурных (B,r,b) и нагрузочных $(\lambda_i,\mu_i,\ i=1,2)$ параметров системы необходимо решать систему уравнений равновесия (СУР), что при большой размерности ФПС (1) связано с огромными вычислительными трудностями. Для их преодоления здесь предлагается новый подход.

Рассмотрим следующее расщепление ФПС (1):

$$E = \bigcup_{i=0}^{r} E_i,\quad E_i \bigcap E_j = \varnothing,\quad i \ne j, \tag{5}$$

где $E_i := \{\boldsymbol{n}\in E : n_1 = i\},\ i=\overline{0,r}$.

Класс E_i объединяется в отдельное укрупненное состояние $<i>$ и на исходном ФПС E вводится функция укрупнения

$$U(\boldsymbol{n}) = <i>,\ \text{если}\ \ \boldsymbol{n}\in E_i,\ i=\overline{0,r}. \tag{6}$$

Функция укрупнения (6) определяет укрупненную ЦМ с ФПС $\hat{E} := \{<i>: i=\overline{0,r}\}$.

Далее применяются известные процедуры алгоритма фазового укрупнения (АФУ) для приближенного определения стационарного распределения исходной модели

$$p(\boldsymbol{n}) \approx \rho^{n_1}(\boldsymbol{n})\pi(<n_1>), \boldsymbol{n}\in E_{n_1}, \tag{7}$$

где $\{\rho^i(\boldsymbol{n}): \boldsymbol{n}\in E_i\}$ и $\{\pi(<i>): <i>\in \hat{E}\}$ — стационарное распределение соответственно внутри класса E_i и укрупненной ЦМ.

Не умаляя строгости рассуждений, опустим промежуточные математические выкладки и приведем лишь конечные результаты вычисления стационарных распределений, входящих в (7) (подробнее об основах данного подхода в работах [6–9]):

$$\rho^i(i,k) = \begin{cases} v_2^k C_1 / C_{b+1}, & \text{если} \quad i=\overline{0,B-b}, \quad k=\overline{0,b}, \\ v_2^k C_1 / C_{B+1-i}, & \text{если} \quad i=\overline{B-b+1,r}, \quad k=\overline{0,B-i}, \end{cases} \tag{8}$$

$$\pi(<k>) = \begin{cases} (v_1/C_{b+1})\prod\limits_{i=o}^{k-1} C_{r-i}\pi(0), & \text{если} \quad k=\overline{1,B-b+1}, \\ (v_1^k / C_{b+1}^{B-b+1})\prod\limits_{i=o}^{k-1} C_{r-i} \Big/ \prod\limits_{i=B-b+2}^{k} C_{B+1-i}, & \text{если} \quad k=\overline{B-b+2,r}, \end{cases} \tag{9}$$

где

$$\pi(<0>) = \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{B-b+1} (\nu_1 / C_{b+1})^k \prod_{i=0}^{k-1} C_{r-i} + \right.$$

$$\left. + \sum_{k=B-b+2}^{r} (\nu_1^k / C_{b+1}^{B-b+1}) \prod_{i=0}^{k-1} C_{r-i} / C_{B+1-i} \right\}^{-1}, \tag{10}$$

$$\nu_i = \lambda_i / \mu_i, \quad i = 1,2; \quad C_k = 1 - \nu_2^k, \quad k = \overline{1, b+1}.$$

Окончательно, с использованием выражений (7) – (10), можно предложить следующий алгоритм вычисления вероятностей $CLP_i(B,b,r)$, заданных соотношениями (3), (4) (для краткости здесь приведен алгоритм при $\nu_2 \neq 1$, а при $\nu_2 = 1$ соответствующие формулы еще более упрощаются).

Шаг 1. Для $i = 0,1,...,r$ вычислить $\pi(<i>)$ из (9), (10).

Шаг 2. Вычислить $CLP_i(B,b,r)$, $i = 1,2$ по формулам

$$CLP_1(B,b,r) = \left(C_1 / C_{b+1}\right) \sum_{k=0}^{B-b} \pi(<k>) \sum_{i=r-k}^{b} (1 - C_i) +$$

$$+ C_1 \sum_{k=B-b+1}^{r-1} \left(\pi(<k>) / C_{B-k+1}\right) \sum_{i=r-k}^{B-k} \left(1 - C_i\right) + \pi(<r>), \tag{11}$$

$$CLP_2(B,b,r) = C_1 \left(\left(1 - C_b\right) / C_{b+1}\right) \sum_{k=0}^{B-b} \pi(<k>) +$$

$$+ \sum_{k=B-r}^{b-1} \left(\left(1 - C_k\right) / C_{k+1}\right) \pi(<B-k>). \tag{12}$$

Замечание 4. Согласно замечанию 3, стратегии *PBS* и *CS* — частные случаи стратегии *LPBS*. Действительно, если в данном алгоритме положить $b = B$, то получаем соответствующие результаты для стратегии *PBS* [6], а в случае $b = r = B$ — для стратегии *CS* [7].

Предложенный алгоритм позволяет найти границы изменения $CLP_i(B,b,r)$, $i = 1,2$. Действительно, из определения стратегии *LPBS* ясно, что при фиксированных значениях B и r функция $CLP_1(B,b,r)$ является монотонно возрастающей по b, а $CLP_2(B,b,r)$ монотонно убывает по b. Следовательно, для определения границы изменения величин $CLP_i(B,b,r)$ при фиксированных B и r можно использовать такие соотношения:

$$CLP_1(B, B-r, r) \le CLP_1(B,b,r) \le CLP_1(B,B,r), \tag{13}$$

$$CLP_2(B,B,r) \le CLP_2(B,b,r) \le CLP_2(B, B-r, r). \tag{14}$$

Границы изменения $CLP_i(B,b,r)$, $i=1,2$, аналогичные определенным выражениями (13), (14), при фиксированных значениях B и b могут быть найдены следующим образом:

$$CLP_1(B,b,B) \le CLP_1(B,b,r) \le CLP_1(B,b,B-b), \tag{15}$$

$$CLP_2(B,b,B-b) \le CLP_2(B,b,r) \le CLP_2(B,b,B). \tag{16}$$

Границы (13) – (16) оказываются особенно полезными при решении различных задач оптимизации стратегии *LPBS*, когда задаются ограничения на вероятности потери разнотипных заявок.

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный выше алгоритм позволяет исследовать показатели *QS* стратегии *LPBS* при любых диапазонах изменения структурных и нагрузочных параметров модели. Для расчета указанных показателей на основе предложенного алгоритма разработано соответствующее программное обеспечение на языке Delphi 5. С его использованием проведены объемные вычислительные эксперименты в широких диапазонах изменения как структурных параметров стратегии *LPBS*, так и нагрузочных параметров модели. Часть этих результатов для симметричных $(\nu_1=\nu_2)$ и несимметричных $(\nu_1 \ne \nu_2)$ нагрузок при $B=100$ показана на рис. $1-4$. Численные результаты полностью подтвердили теоретические ожидания относительно поведения функций $CLP_i(B,b,r)$, $i=1,2$.

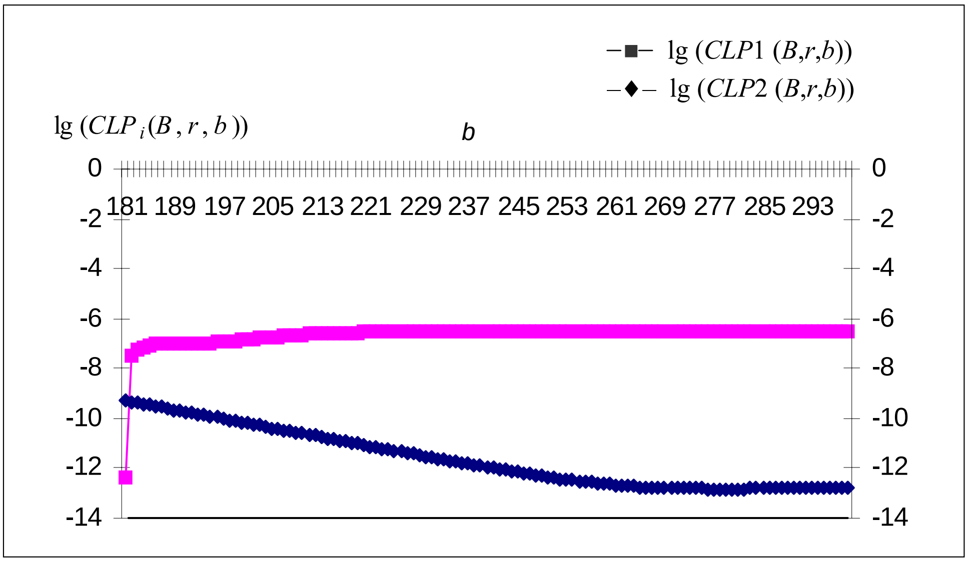

Рис. 1. Зависимость $CLP_i(B,r,b)$ от b при B=300; r=120 и $N1$=$N2$=0,9

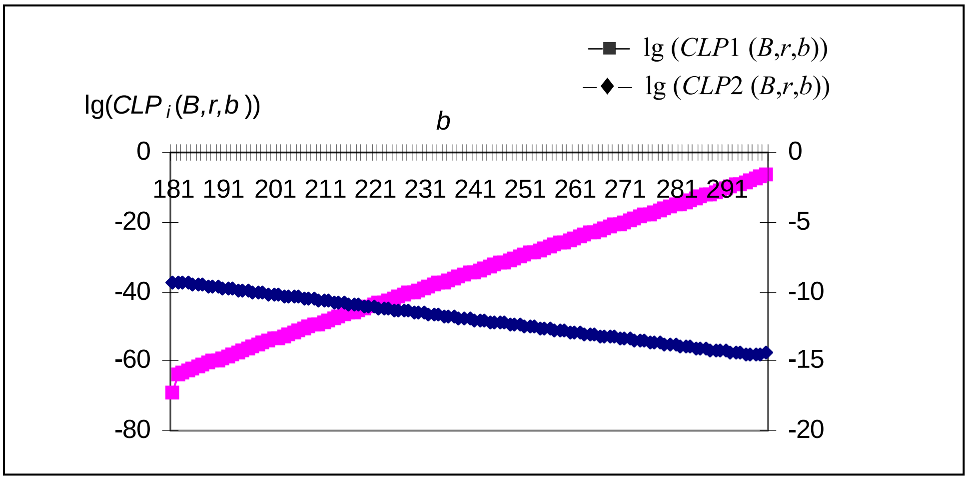

Рис. 2. Зависимость $CLP_i(B,r,b)$ от b при B=300; r = 120 и N1=0,3; N2=0,9

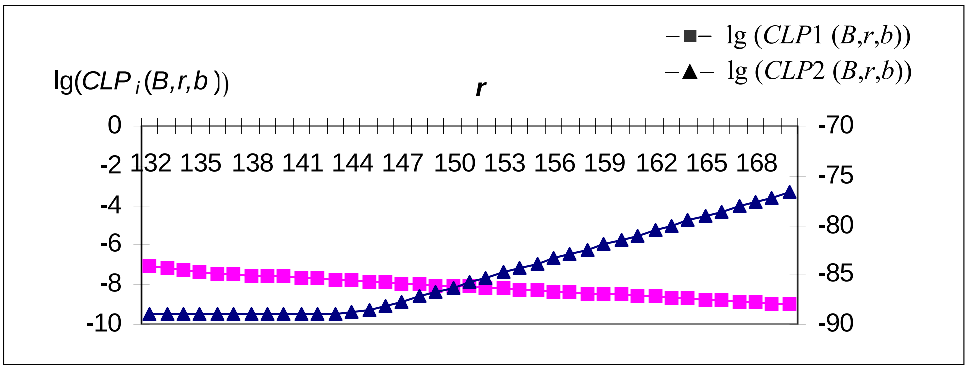

Рис. 3. Зависимость $CLP_i(B,r,b)$ от r при B=300; b=170 и N1=0,9; N2=0,9

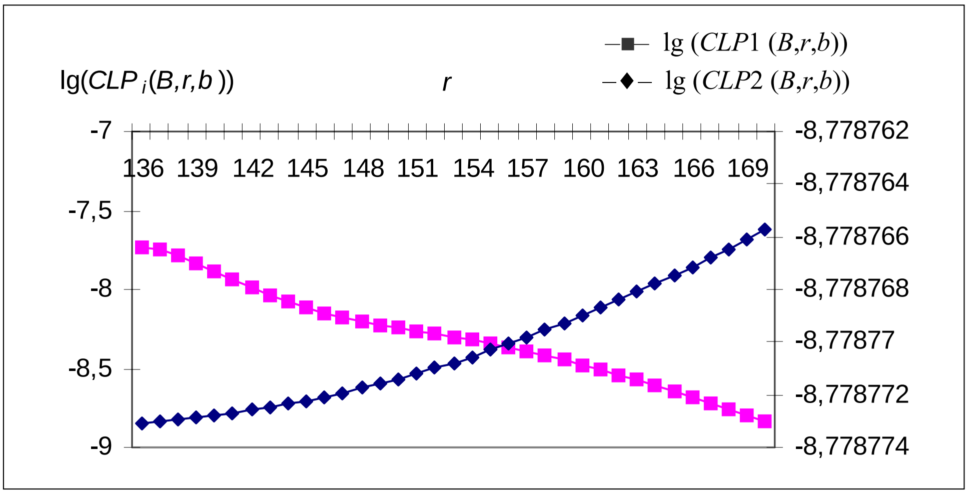

Рис. 4. Зависимость $CLP_i(B,r,b)$ от r при B=300; b=170 и **N**1=0,9; N2=0,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к расчету показателей *QS* стратегии ограниченного частичного распределения буфера в коммутаторах АТМ. Он позволяет найти приближенные формулы для исследования указанных показателей. Приведены формулы лишь для расчета вероятностей потери разнотипных пакетов. Получение формул для других показателей *QS* (среднее число разнотипных пакетов в очереди, утилизация исходящих портов и т.д.) осуществляется стандартными методами через стационарное распределение (7) (для краткости изложения эти формулы здесь не приводятся).

Отметим также, что предложенные соотношения позволяют сформулировать и решить задачи оптимизации показателей *QS* стратегии *LPBS*. Эти задачи являются объектами дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Guerin R., Peris V.* Quality-of-service in packet networks: Basic mechanisms and directions // Comp. Networks. — 1999. — **31**. — P. 169–189.
2. *Matsufuru N., Nishumira K., Aibara R*. Performance analysis of buffer management mechanisms with delay constraints in ATM switches // IEICE Trans. Commun. — 1998. — **E81-B**. — P.431–439.
3. *Hluchyj M.G., Karol M.J*. Queueing in high-performance packet switching // IEEE J.Select.Areas Commun. — 1988. — **6**. — P.1587–1597.
4. *Kamoun F., Kleinrock L*. Analysis of shared finite storage in a computer network node environment under general traffic conditions // IEEE Trans. Commun. — 1980. — **28**. — P. 992–1003.
5. *Korolyuk V.S., Korolyuk V.V*. Stochastic models of systems. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. — 185 p.
6. *Melikov A.Z., Fattahova M.I., Feyziyev V.Sh*. Analysis and optimization of the strategy of partial distribution of a buffer in ATM networks // Automatic Control and Computer Science. — 2002. — **36**, № 5. — P. 46–54.
7. *Melikov A.Z., Fattahova M.I.* Approximate analysis of quality-of-service in integrated networks nodes // Automatic Control and Computer Science. — 2002. — **36**, № 2. — P. 34–40.
8. *Melikov A.Z., Fattahova M.I.* Problems of optimization of the indicators of service quality in the nodes of integrated networks // Automatic Control and Computer Science. — 2003. — **37**, № 1. — P. 56–61.
9. *Пономаренко Л.А., Меликов А.З*., *Фаттахова М.И*. Обобщенный алгоритм расчета характеристик стратегий Клейнрока-Камоуна для распределения буфера в сетях коммутации пакетов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 2. — С. 63–72.

Поступила 22.11. 2003