

О. Ю. ВСЕЕВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ДАТАГРАММНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Сегодня наиболее распространенными протоколами маршрутизации в IP-сетях, реализующих датаграммный режим информационного обмена, являются RIP, OSPF и EIGRP, в основу которых положены алгоритмы поиска кратчайшего пути. Как показала практика, маршрутизация поступающего в сеть трафика вдоль единственного кратчайшего пути, который вычисляется в соответствии с некоторой метрикой и без учета текущей загрузки направлений связи, приводит к неэффективному использованию ресурсов. С целью устранения данной проблемы была разработана концепция Traffic Engineering (TE), которая формулирует в общем виде задачу и требования к степени использования сетевых ресурсов: достижение сбалансированности загрузки всех ресурсов. Концепция TE вызывает необходимость пересмотра основных стратегий маршрутизации и требует реализации принципов системного подхода при решении маршрутных задач. С учетом системных требований наиболее адекватную формализацию динамических процессов обеспечивают модели, представленные в пространстве состояний. Примером такой модели является динамическая модель адаптивной маршрутизации, разработанная в [1] и развитая в направлении сетей с виртуальными соединениями [2], гибридных сетей [3] и сетей с комбинированным типом маршрутизации [4]. В этой связи особую актуальность приобретает ее экспериментальное исследование с целью выработки рекомендаций по практической реализации.

Основные задачи экспериментального исследования модели маршрутизации: анализ свойств прогнозирования модели и исследование ее работы в режиме, близком к перегрузке, а также влияния параметров модели на основные показатели эффективности сети.

Математическая модель маршрутизации. Модель телекоммуникационной сети (ТКС) может быть представлена следующей системой управляемых уравнений загрузки буферов очередей на маршрутизаторах:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N b_{i,l}(k) u_{i,l}^j(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^N b_{m,i}(k) u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $b_{i,l}(k) = c_{i,l}(k)\Delta t$; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k)\Delta t$; $i, j = \overline{1, N}$; $k = 0, 1, 2, \dots$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – период перерасчета маршрутных переменных; N – число маршрутизаторов в сети; $x_{i,j}(k)$ – объем данных, находящихся на маршрутизаторе i и предназначенных для передачи j -му маршрутизатору в момент времени t_k ; $c_{i,j}(k)$ – скорость передачи данных в момент времени t_k в тракте (i, j) ; $u_{i,l}^j(k)$ – доля пропускной способности тракта (i, l) , выделенная пользовательскому трафику с адресом j в момент времени t_k ; $\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность поступления данных на i -й маршрутизатор в момент времени t_k с адресатом j от пользователей сети.

Система уравнений (1) описывает ТКС как дискретную управляемую динамическую систему, где управляющими переменными являются маршрутные переменные $u_{i,l}^j(k)$. При решении маршрутной задачи, оптимальной по некоторому критерию, система (1) выступает в качестве динамических ограничений. Кроме динамических ограничений (1), на переменные

состояния и маршрутные переменные накладываются минимаксные и интегральные ограничения, связанные с физическим смыслом этих переменных:

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_{i,j}^{\max}, \quad (2)$$

$$0 \leq u_{i,l}^j(k) \leq 1, \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N u_{i,l}^n(k) \leq 1, \quad (4)$$

где $x_{i,j}^{\max}$ – максимально допустимая величина очереди на маршрутизаторе i для трафика с адресатом j .

Система уравнений (1) может быть представлена в векторно-матричной форме:

$$X(k+1) = X(k) + BU(k) + Y(k), \quad (5)$$

где $X(k) = [x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k)]^T$ – вектор загрузки буферных устройств на маршрутизаторах транспортной подсистемы в момент времени размерности $N(N-1)$;

$U(k) = [u_{1,2}^2(k), \dots, u_{i,l}^j(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1}(k)]^T$ – вектор маршрутных переменных размерности $N(N-1)^2$, в соответствии с которыми в сети реализуется процесс маршрутизации в момент времени t_k ; $B(k)$ – матрица пропускных способностей трактов между маршрутизаторами в момент времени t_k размерности $N(N-1) \times N(N-1)^2$, элементами которой являются $b_{i,j}(k)$;

$Y(k) = [y_{1,2}(k), \dots, y_{i,j}(k), \dots, y_{N,N-1}(k)]^T$ – вектор пользовательской нагрузки в момент времени t_k размерности $N(N-1)$.

Периодический сбор информации (через каждые Δt) о состоянии сети в виде компонент вектора $X(k)$, а также об интенсивности поступающей в сеть абонентской загрузки $Y(k)$ наделяет приведенную модель маршрутизации свойством адаптивности.

В качестве критерия оптимальности для решения задачи маршрутизации в рамках приведенной модели выберем минимум квадратичного функционала

$$J = \sum_{k=0}^{a-1} [X^T(k) \cdot Q_X \cdot X(k) + U^T(k) \cdot Q_U \cdot U(k)] \rightarrow \min, \quad (6)$$

где a – количество интервалов Δt , для которых осуществляется расчет маршрутных переменных; Q_X, Q_U – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы, обусловленные приоритетностью очередей и важностью цифровых трактов передачи данных.

Физически функционал (6) характеризует суммарную стоимость использования сетевых ресурсов при организации адаптивной маршрутизации. При этом первое слагаемое определяет затраты по использованию буферных устройств маршрутизаторов сети, а второе – количественно отображает стоимость использования канальных ресурсов ТКС. Введение $a > 1$ дает возможность учета величины поступающей (или ожидаемой) нагрузки в момент времени t_k (в дальнейшем на k -м временном интервале) на некотором упреждающем интервале (интервале прогнозирования) $T = a\Delta t$.

Таким образом, задача адаптивной маршрутизации может быть представлена как оптимизационная задача по минимизации стоимостного функционала (6) при ограничениях (2) – (5), для решения которой разработаны эффективные подходы в рамках методов вариационного исчисления [2; 5].

Показатели эффективности функционирования. Важным достоинством предложенной модели является возможность непосредственной аналитической оценки производительности сети и степени использования ее ресурсов в процессе функционирования. Производительность сети на k -м временном интервале можно оценить по величине доставленной получателям сети нагрузки $Y'(k)$. Данная величина зависит от конфигурации сети, пропускных способностей отдельных направлений связи и применяемой стратегии маршрутизации, т.е. текущего значения маршрутных переменных, и может быть выражена следующим образом:

$$Y'(k) = \sum_i^N \sum_j^{N-1} b_{i,j} u_{i,j}^j(k). \quad (7)$$

Тогда относительная производительность сети на k -м временном интервале может быть записана в виде

$$P(k) = \frac{Y'(k)}{Y(k)}. \quad (8)$$

С целью оценки степени использования сетевых ресурсов введем в рассмотрение следующие параметры сети: коэффициент использования пропускной способности отдельного канала связи (i, j) $K_{i,j}$

$$K_{i,j}(k) = \sum_m^N u_{i,j}^m(k) \quad (9)$$

и сети в целом $K_{исп}$

$$K_{исп}(k) = \frac{\sum_i^N \sum_j^{N-1} K_{i,j}(k)}{N(N-1)}. \quad (10)$$

Согласно выражениям (9), (10), параметры эффективности использования канальных ресурсов могут быть получены непосредственно на основании рассчитанных векторов $U(k)$, исходя из физического смысла их компонент.

В рамках принятых обозначений ограничение (4) можно записать в виде

$$K_{i,j}(k) \leq K_{\max} \leq 1. \quad (11)$$

Практическая реализация требований ТЕ в современных датаграммных сетях сводится к введению ограничения (11), которое обеспечивает снижение степени использования канальных ресурсов направлений связи, входящих в состав кратчайших путей, и побуждает к использованию обходных маршрутов, тем самым обеспечивая борьбу с перегрузками в сетях. Значение K_{\max} в такой постановке определяется конфигурацией конкретной сети и протекающим трафиком и подбирается для каждой сети отдельно. В отличие от ТЕ в рамках предлагаемой модели использование обходных маршрутов обусловлено выбором целевого функционала (6), а ограничение (4) связано с физическим смыслом маршрутных переменных и гарантирует отсутствие физической перегрузки всех направлений связи информационными потоками как прямых, так и обходных маршрутов.

Анализ модели маршрутизации. С целью оценки основных показателей эффективности сети, функционирующей в рамках предложенной динамической модели адаптивной маршрутизации, проведем моделирование на примере полносвязной сети, состоящей из пяти маршрутизаторов, пропускные способности каналов связи между которыми составляют 10 Мбит/с. Поступающая в сеть нагрузка $y_{i,j}(k)$ является изменяющейся величиной с известной динамикой. Общее время моделирования $T = 10$ с. При моделировании были рассмотрены четыре варианта реализации модели маршрутизации, различающихся по величине интервала перерасчета маршрутных переменных Δt и их количеству a . Эти параметры модели приведены в таблице. Здесь вариант 1 соответствует наиболее частому обновлению маршрутных векторов, а в случае 4 на протяжении всего времени моделирования маршрутные векторы меняться не будут. Результатом моделирования для каждого из рассматриваемых вариантов является набор из a маршрутных векторов, описывающих процесс маршрутизации на протяжении времени T и определяющих содержание маршрутных таблиц.

Вариант	$\Delta t, c$	a
1	1	10
2	2	5
3	5	2
4	10	1

На рис. 1 показана динамика величины поступившей в сеть $Y(k)$ и доставленной получателю нагрузки $Y'(k)$ в рамках моделируемой сети в зависимости от номера временного интервала, на протяжении которого наблюдается данное значение. Зависимости с номерами 1 – 4 соответствуют величине $Y'(k)$ для рассматриваемых вариантов (таблица), а зависи-

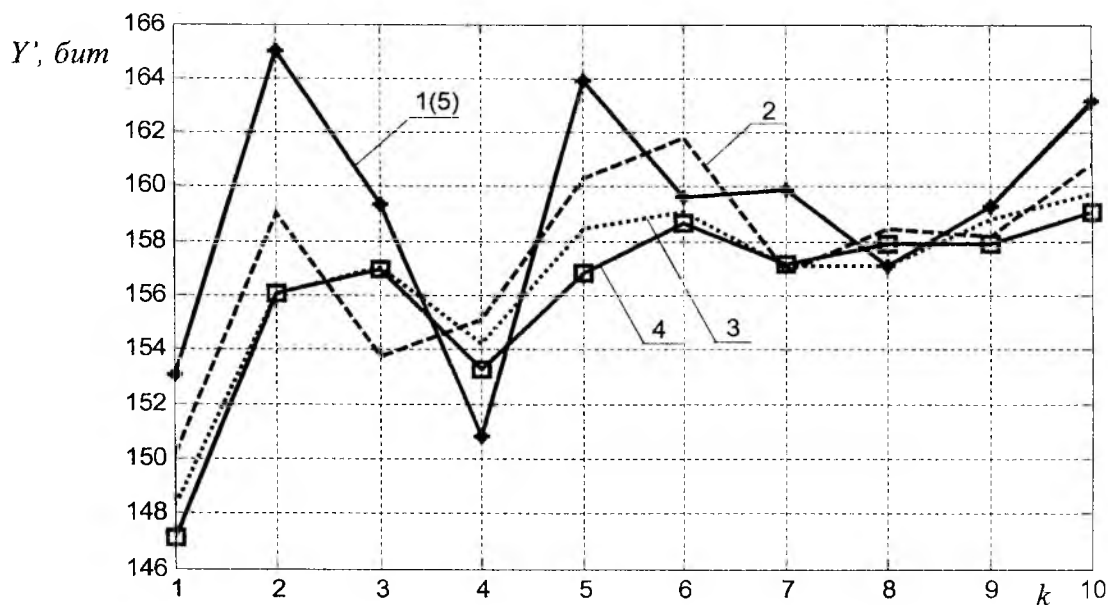


Рис. 1

мость под номером 5 отражает изменение $Y(k)$. На рис. 2 приведены соответствующие изменения коэффициента использования пропускной способности сети от номера временного интервала. Изменения величины поступающей нагрузки вызывают изменение степени использования ее ресурсов в соответствии с заданным интервалом перерасчета маршрутных таблиц. Хотя среднее значение $K_{исп}$ в течение времени моделирования приблизительно одинаково для всех рассматриваемых случаев, динамика его изменений наиболее высока для случая с наименьшим Δt .

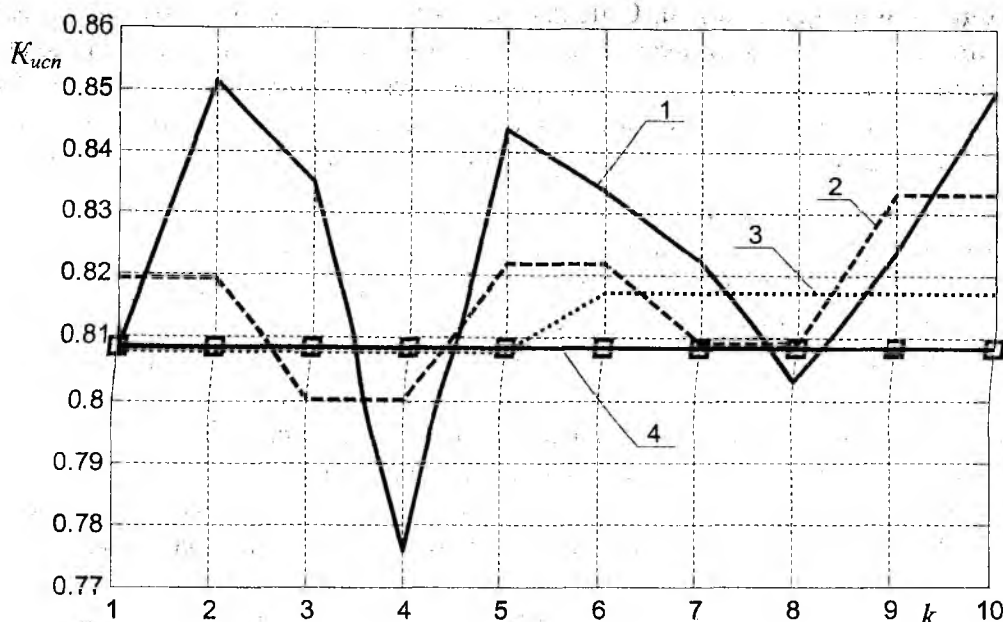


Рис. 2

Для варианта 1 реализуемой модели сопоставление динамики изменения $Y(k)$ и $K_{исп}$ свидетельствует, что ресурса выделяется ровно столько, чтобы обслужить без потерь трафик, поступивший за время Δt , и в результате информация полностью доводится получателю. В случае увеличения Δt (зависимости 2–4) изменения $K_{исп}$ уже не соответствуют изменениям в нагрузке. В результате появляется запаздывание доведенного трафика, что в реальной сети соответствует росту очередей и, как следствие, росту величины потерь и появлению перегрузок, что в конечном итоге снижает качество обслуживания.

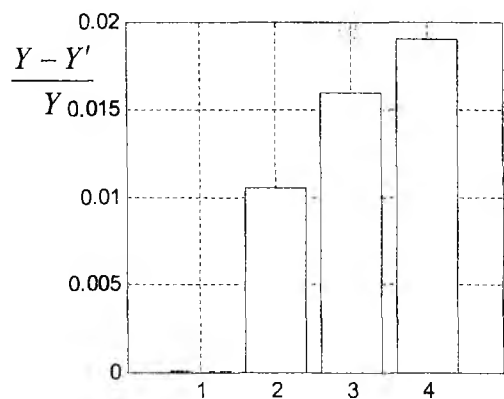


Рис. 3

В качестве обобщения полученных результатов моделирования на рис. 3 показана диаграмма, оценивающая величину

$$\frac{Y - Y'}{Y} = \frac{\sum_{k=0}^{a-1} Y(k) - \sum_{k=0}^{a-1} Y'(k)}{\sum_{k=0}^{a-1} Y(k)}$$

как относительный объем недоведенной пользователю информации для рассматриваемых вариантов 1–4. Из диаграммы видно, что наиболее высокая производительность сети достигается в случае 1, что объясняется наименьшим интервалом перерасчета маршрутных таблиц в условиях высокой динамики поступающей нагрузки.

Анализ результатов моделирования показывает, что параметры модели Δt и a существенно влияют на качество решения задачи маршрутизации, что позволяет сделать следующие частные выводы. Во-первых, период перерасчета таблиц маршрутизации определяется интенсивностью изменения поступления нагрузки в сеть и должен быть равен времени, в течение которого поступающую нагрузку можно считать неизменной. Следует сказать, что теоретически величина Δt должна быть как можно меньше, чтобы можно было реагировать на малейшие изменения мгновенного значения $y(k)$. Однако на практике это сопряжено со значительным ростом объемов служебной информации, что может сделать алгоритм нецелесообразным и в связи с чем возникает отдельная задача по выбору рационального значения Δt .

Во-вторых, влияние количества интервалов прогнозирования a на качество маршрутизации приводит к необходимости определения его оптимального значения. С точки зрения практической реализации, интервал прогнозирования должен быть как можно больше, чтобы каждый маршрутизатор имел информацию об изменениях маршрутных таблиц на a интервалов вперед. Однако увеличение интервала прогнозирования ведет к росту числа переменных состояний и маршрутных переменных, увеличению размерности решаемой задачи времени расчета. Кроме того, возникает отдельная задача прогнозирования поступающей нагрузки на длительный интервал времени.

С целью экспериментального исследования адаптивных свойств, свойств прогнозирования, т.е. влияния величины a на качество решения задачи маршрутизации, и анализа поведения модели в условиях, близких к перегрузкам, рассмотрим неполносвязную сеть (рис. 4), пропускные способности каналов связи в которой составляют 2 Мбит/с. Поступающая нагрузка выбрана близкой к пропускной способности сети, причем нагрузка в направлении 1-2 в 1,5 раза превосходит среднее значение нагрузки по сети. Рассмотрим два варианта модели адаптивной маршрутизации с параметрами $a = 5$ и $a = 1$, т.е. модель, обладающая свойством прогнозирования (вариант 1) и не обладающая таковым (вариант 2). Общее время моделирования $T = 5$ с, интервал $\Delta t = 1$ с. В рассмотрение включена также модель статической маршрутизации, реализованной на основе алгоритма кратчайшего пути. При этом, если несколько потоков проходят через одно направление связи, его каналные ресурсы делятся между этими потоками в равной степени.

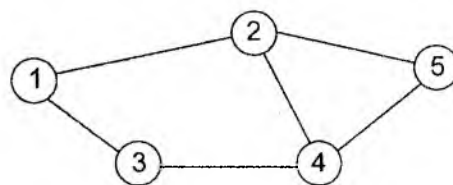


Рис. 4

На рис. 5 приведена зависимость объемов доведенной информации $Y'(k)$ для двух вариантов модели адаптивной маршрутизации (кривые 1 и 2) и статической маршрутизации (линия 3) для сети неполносвязной структуры (рис. 4). Полученные зависимости свидетель-

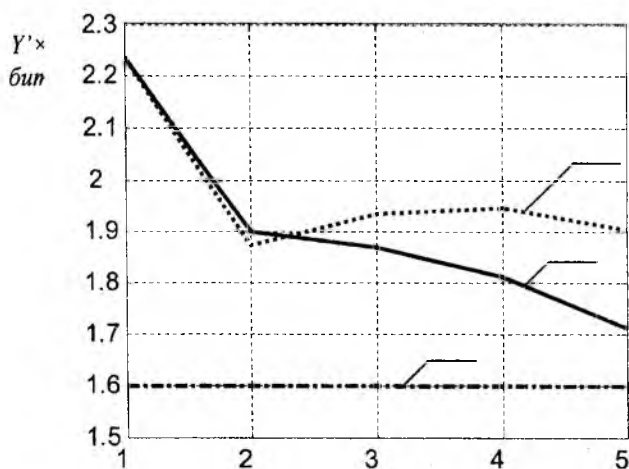


Рис. 5

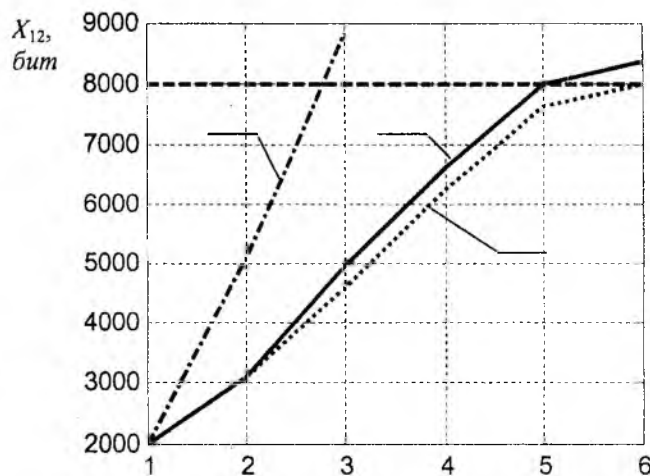


Рис. 6

ствуют о том, что статическая маршрутизация по производительности значительно уступает адаптивным алгоритмам. Сравнивая между собой адаптивные модели маршрутизации, видим, что в течение первой половины времени моделирования алгоритм маршрутизации без прогнозирования (кривая 2) по объему доставленной информации превосходит алгоритм с прогнозированием (кривая 1), а во второй половине уступает. Это объясняется различными маршрутными стратегиями, реализуемыми рассматриваемыми алгоритмами. Алгоритм без прогнозирования обеспечивает минимум целевого функционала (6) на каждом временном интервале за счет использования направлений связи главным образом для доставки прямых потоков, например, направление связи 1-2 практически на 100% используется для доведения

потока x_{12} . На интервалах $k=0..2$ это дает определенный выигрыш, но затем ($k=4..5$) приводит к перегрузкам. Для примера на рис. 6 показано изменение величины очереди X_{12} , которое свидетельствует о том, что алгоритм маршрутизации без прогнозирования допускает вход в режим перегрузки несколько раньше. Алгоритм с прогнозированием обеспечивает минимизацию функционала (6) в целом за все время моделирования T и уже с самого начала работы ($k=0..2$) организует не только прямые, но и транзитные маршруты, т.е. доля доведенного трафика, для которого существуют прямые пути доведения, уменьшается. За счет этого суммарный объем доставленной информации в течение $k=0..2$ становится меньше, но на последующих временных интервалах $k=4..5$, когда сеть с алгоритмом 2 уже близка к режиму перегрузки или вошла в него, алгоритм 1 обеспечивает доставку пользовательской информации без потерь.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование динамической модели адаптивной маршрутизации в датаграммных телекоммуникационных сетях. Модель представлена системой линейных разностных управляемых уравнений состояния сети. Исследовано влияние изменения отдельных параметров модели – периода перерасчета маршрутных переменных Δt и периода прогнозирования a . Произведена оценка показателей эффективности сети, в качестве которых были выбраны производительность сети и коэффициенты использования ее ресурсов.

Результаты моделирования подтвердили преимущества реализации адаптивной стратегии маршрутизации с прогнозированием в рамках приведенной динамической модели сети. Это выразилось в том, что прогнозирование состояния сети на некотором упреждающем интервале a позволило увеличить производительность сети до 5–10 % по сравнению с адаптивной маршрутизацией без прогнозирования и на 25% по сравнению со статической маршрутизацией.

К достоинствам предложенной модели можно отнести также тот факт, что алгоритм адаптивной маршрутизации с прогнозированием сбалансированно использует доступные ресурсы сети (см. рис. 2), что в конечном итоге позволяет предотвратить или отсрочить перегрузку отдельных направлений и сети в целом.

Стоит отметить, что выбор минимального Δt и предельного a представляет отдельную экспериментальную задачу и определяет дальнейшее направление исследований в этой области.

Список литературы: 1. Segall A. The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. P. 85 – 95. 2. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гема Н.И. Динамическая маршрутизация в пакетных сетях с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 123. С. 45 – 50. 3. Евсеева О.Ю. Динамическая маршрутизация в гибридных телекоммуникационных сетях // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 128. С. 86 – 90. 4. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Функциональная модель адаптивной маршрутизации комбинированного типа // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 127. С. 152 – 157. 5. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.04.2003