

УДК 519.6: 629.7.036.3

А.В. ВОРОБЬЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ЛОКАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*Проанализирована задача балансировки нагрузки. Показана необходимость перехода от статических методов балансировки нагрузки к динамическим, позволяющим повысить эффективность функционирования телекоммуникационной сети. Рассмотрен метод локальных динамических моделей для решения задач балансировки нагрузки. Проведено исследование эффективности рассмотренного метода на однопродуктовой сети. Предложены рекомендации по выбору режимов работы метода. Предложены рекомендации по особенностям применения метода локальных динамических моделей в случаях не стационарности интенсивности поступающей нагрузки в сеть.*

**Ключевые слова:** маршрутизация, оптимизация, динамическое управление, балансировка нагрузки, распределение ресурсов, моделирование.

### Введение

Решение задач маршрутизации занимает важное место в функционировании телекоммуникационных систем (ТКС) и напрямую влияет на эффективность их работы [1, 2].

В ТКС для решения задач маршрутизации используются распределенные подходы управления, которые обладают высокой сходимостью, но при этом приводят к неравномерной загрузке сети. Перспективным направлением развития является оптимальная маршрутизация, использование которой на практике предполагает реализацию централизованного подхода к управлению сетью. Такое управление, хотя теоретически дает лучшие результаты, на практике связано с рядом трудностей. Основными недостатками являются большая размерность модели ТКС и медленная сходимость, поскольку управление зависит от глобальных параметров, которые трудно знать априорно. При имеющихся недостатках полностью децентрализованного и централизованного управления, возникает потребность в объединении их положительных особенностей [3].

В такой ситуации возникает необходимость в новых методах, которые позволят обеспечить эффективность распределения нагрузки, а также будут совместимы с существующими распределенными методами маршрутизации. Одним из возможных вариантов решения такой задачи может быть введение дополнений к существующим методам маршрутизации, которые будут выполнять более сбалансированное распределение нагрузки на локальных участках сети. Некоторые попытки реализовать данный подход привели к созданию методов балансировки нагрузки [4].

### Анализ методов балансировки нагрузки

В большинстве современных маршрутных протоколов возможные пути следования сетевого трафика определяются значением наименьшей суммарной стоимости (метрики) на основе алгоритмов поиска «кратчайшего» пути. При наличии в сети нескольких равноценных альтернативных маршрутов осуществляется балансировка (равномерное распределение) нагрузки (БН).

Балансировка нагрузки (*load balancing*) – способность маршрутизатора распределять трафик по всем сетевым портам, которые находятся на одинаковом расстоянии от получателя. В алгоритмах распределения нагрузки используется информация о пропускной способности и надежности каналов. Распределение нагрузки повышает интенсивность использования сетевых сегментов, а значит, и эффективную пропускную способность сети в целом [4].

Ранее в работе [5], было проведено краткое сравнение методов балансировки нагрузки используемых в протоколах OSPF, RIP, EIGRP, более расширенное и дополненное сравнение показано в табл. 1. Несмотря на то, что в последнее время появляется ряд работ посвященных решению задач БН предлагаемые решения пока не нашли широкого внедрения в практику управления IP-сетями уровня MAN и WAN, а потому вопрос остается открытым. Приведенные недостатки указывают на то, что решение задачи балансировки нагрузки еще далеко от своего завершения и требует дальнейших исследований.

При разработке новых методов БН необходимо учитывать:

Таблица 1

Сравнение протоколов OSPF, EIGRP и RIP по реализации балансировки нагрузки

Сравниваемый параметр	Метод БН в составе протокола маршрутизации		
	OSPF	EIGRP	RIP
БН между маршрутами с одинаковой метрикой	+	+	+
БН между маршрутами с разной метрикой	-	+	-
По-пакетно (per-packet)	+	+	+
По-получателю (per-destination)	+	+	+
Учет состояния загруженности каналов связи выходящих из маршрутизатора	-	-	-
Динамический перерасчет управляющих переменных	-	-	-
Автоматический выбор режимов работы метода БН при изменяющихся условиях	-	-	-
Согласованность работы метода БН с методами обработки очередей	-	-	-

- динамику при перерасчете управляющих переменных;
- возможность реализации автоматической работы по выбору режимов работы метода;
- согласованность с методами обработки очередей;
- состояния загруженности каналов связи выходящих из маршрутизатора;
- возможность реализации БН по маршрутам с разной стоимостью.

В работе [5] был предложен метод локальных динамических моделей (ЛДМ), позволяющий устранить ряд недостатков существующих методов рассмотренных в таблице. Однако существует сложность в реализации этого метода, заключающаяся в необходимости подобрать такие значения элементов матрицы определяющей важность каналов связи выходящих из маршрутизатора, которые бы обеспечили максимальную эффективность работы на локальном участке и сети в целом.

### Постановка задачи исследования

В статье исследуется эффективность метода ЛДМ при различных значениях элементов матрицы определяющей важность каналов связи выходящих из маршрутизатора в условиях изменения интенсивности входной нагрузки с целью достижения максимальной производительности работы сети.

### Метод локальных динамических моделей

Метод ЛДМ, позволил устранить недостатки существующих методов БН. В его основу положена динамическая модель маршрутизатора состоящая из функциональной и структурной моделей представленных в пространстве состояний.

Для описания структуры сети применяется ориентированный взвешенный граф, вершины которого  $V_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , моделируют узлы (которыми, как правило, выступают маршрутизаторы) ТКМ, а дуги  $E_{i,j}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ , - каналы связи, где  $N$  - количество узлов сети. Так, основной характеристикой узлов является объем их буферной памяти  $x_i^{\max}$ , а каналов связи - их пропускные способности  $c_{i,j}$ .

Динамическая функциональная модель маршрутизатора может быть представлена системой дифференциально-разностных уравнений в дискретные моменты времени  $t_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$ , с интервалом дискретизации  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ . В качестве переменных состояний выберем величины загрузки буфера на маршрутизаторе тем трафиком, для достижения которого имеется несколько маршрутов. В качестве управляющих выберем балансировочные переменные, которые соответствуют частям пропускной способности тех интерфейсов маршрутизатора, между которыми осуществляется БН.

Количество уравнений для описания работы маршрутизатора в общем случае равно  $N-1$ , а в частном случае с целью решения распределения нагрузки его можно определить через количество получателей, для достижения которых имеется несколько маршрутов с разной стоимостью. Таким образом, динамическую модель маршрутизатора можно представить в следующем виде:

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

где  $x_{i,j}(k)$  – объем данных, находящихся в момент времени  $t_k$  на текущем маршрутизаторе  $V_i$  и предназначенных для маршрутизатора  $V_j$ , достижение которого возможно по нескольким маршрутам с разной метрикой;

$b_{i,1}(k) = c_{i,1}(k)\Delta t$ ,  $c_{i,1}(k)$  – пропускная способность канала связи (интерфейса маршрутизатора)  $E_{i,1}$ , через который выполняется распределение нагрузки за вычетом пропускной способности, уже отведенной под другие задачи;

$u_{i,1}^j(k)$  – доля пропускной способности канала  $E_{i,1}$ , выделенная в момент времени  $t_k$  для передачи трафика, предназначенного маршрутизатору  $V_j$ ;

$b_{m,i}(k) = c_{m,i}(k)\Delta t$ ,  $c_{m,i}(k)$  – пропускная способность канала связи (интерфейса маршрутизатора)  $E_{m,i}$ , через который данные поступают от соседних маршрутизаторов;

$u_{m,i}^j(k)$  – доля пропускной способности канала  $E_{m,i}$ , выделенная в момент времени  $t_k$  для передачи транзитного трафика, проходящего через текущий маршрутизатор  $V_i$  и предназначенного маршрутизатору  $V_j$ ;

$y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k)\Delta t$ ,  $\zeta_{i,j}(k)$  – интенсивность поступления нагрузки в момент времени  $t_k$  от абонентов сети на узел  $V_i$ , предназначенной для маршрутизатора  $V_j$ ;  $\Delta t$  – период перерасчета управляющих переменных.

На введенные переменные состояния и управления с целью исключения возможности перегрузки маршрутизатора, что связано с ограниченностью буферной очереди на маршрутизаторе и пропускных способностей каналов связи (интерфейсов маршрутизатора), наложены ограничения

$$\begin{aligned} 0 \leq u_{i,1}^j(k) \leq 1, \quad \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N u_{i,1}^l(k) \leq 1, \\ 0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_i^{\max}, \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N x_{i,j}(k) \leq x_i^{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_i^{\max}$  – объем буфера на маршрутизаторе.

Систему уравнений (1) в векторно-матричном виде можно представить следующим образом:

$$\vec{x}(k+1) = A(k)\vec{x}(k) + B(k)\vec{u}(k) + \vec{y}(k), \quad (3)$$

где  $\vec{x}(k)$  – вектор переменных состояния (объемы буферов маршрутизатора);

$\vec{u}(k)$  – вектор переменных входа (балансировки нагрузки);

$\vec{y}(k)$  – вектор управляемых возмущений (внешней нагрузки);

$B(k)$  – матрица, элементами которой в соответствии с выражением (1) являются величины  $\pm b_{i,j}(k)$ ;

$A(k)$  – единичная матрица.

Задача распределения нагрузки в рамках приведенной модели может быть рассмотрена как задача по минимизации некоторого целевого функционала при наличии ограничений.

Для решения подобного рода задач на сегодняшний день существует достаточно большой выбор методов [6, 7].

Так, в качестве критерия оптимизации выбираем минимум квадратичного функционала:

$$J = \sum_{k=0}^{K-1} \left[ \vec{x}^T(k)Q\vec{x}(k) + \vec{u}^T(k)R\vec{u}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $Q$ ,  $R$  – диагональные, положительно определенные весовые матрицы, определяемые приоритетностью очереди на маршрутизаторе и важностью каналов связи, выходящих из этого маршрутизатора;  $K$  – количество интервалов  $\Delta t$ .

На рис. 1 представлена структурная схема работы метода ЛДМ.

### Исследование эффективности метода локальных динамических моделей

Исследование эффективности метода ЛДМ проводилось при помощи моделирования на основе однопродуктовой сети топология, которой показана на рис. 2.

Сеть состоит из передающего  $A$  (формирует поступающую нагрузку на сеть) и принимающего  $B$  абонентов, 6 маршрутизаторов и 10 каналов связи с соответствующими величинами их пропускных способностей (Мб/с). При этом функции маршрутизации в основном возлагались на маршрутизатор 1 (выделен рамкой на рисунке), который описывался предложенной математической моделью (3) с учетом ограничений (2) и выполняли балансировку нагрузки согласно (4). Время моделирования  $T_M = 100$  с с шагом  $\Delta t = 1$  с.

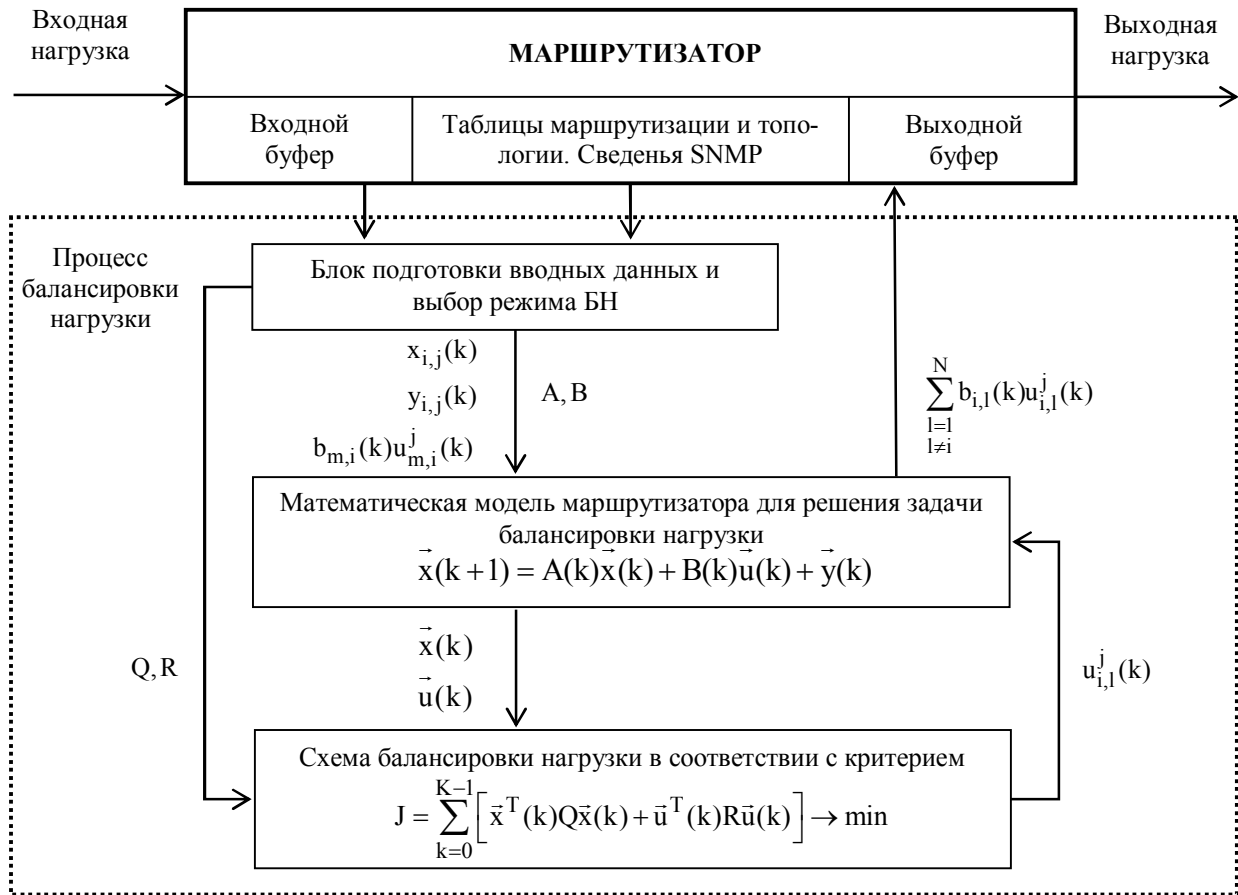


Рис. 1. Структурная схема работы метода ЛДМ

Предполагали, что весь поступающий трафик направлен от маршрутизатора 1 к маршрутизатору 6. Для удобства проведения исследования процесс поступления нагрузки в сеть был детерминированным и задавался интенсивностью поступления трафика со значениями  $y(k)$  равными 70, 170, 270, 370, 470 и 500 Мб/с. При каждом из таких значений входной интенсивности, подбирались такие элементы матрицы  $R$ , при которых достигались равные значения элементов вектора  $\bar{u}(k)$ , что позволяло достичь максимального равномерного использования пропускных способностей выходных каналов связи  $B(k)\bar{u}(k)$  и соответственно максимального значения нормированного показателя производительности сети за все время моделирования  $R_{kn}$ .

*Математическая модель маршрутизатора 1.* Из маршрутизатора 1 к маршрутизатору 6 ведут четыре непересекающихся маршрута, а именно 1,2,6; 1,3,6; 1,4,6; 1,5,6. Матрицы  $B, A, Q$  для маршрутизатора №1 обозначим как  $B1, A1, Q1$ , они имеют следующий вид:

$$B1 = [50 \ 100 \ 150 \ 200], \quad A1 = [1],$$

$$Q1 = [1], \quad y_{1,7}(k) = y(k).$$

Матрицу  $R$  для первого маршрутизатора обозначим  $R1$ , и значения ее элементов подберем таким образом, чтобы добиться максимальной производительности сети.

В итоге модель можно записать так:

$$x_{1,7}(k+1) = [1] \cdot x_{1,7}(k) - [100 \ 60] \cdot \begin{bmatrix} u_{1,2}^7(k) \\ u_{1,3}^7(k) \\ u_{1,4}^7(k) \\ u_{1,5}^7(k) \end{bmatrix} + y_{1,7}(k).$$

*Начальные условия* являются нулевыми для векторов  $x(k), u(k)$  в момент времени  $t_0$ .

*Определение показателей производительности ТКС.* Эффективность функционирования сети за время моделирования  $T_M$ , которое содержит  $K$  временных интервалов ( $T_M = K\Delta t$ ) оценивалась по показателям, рассмотренным в [5].

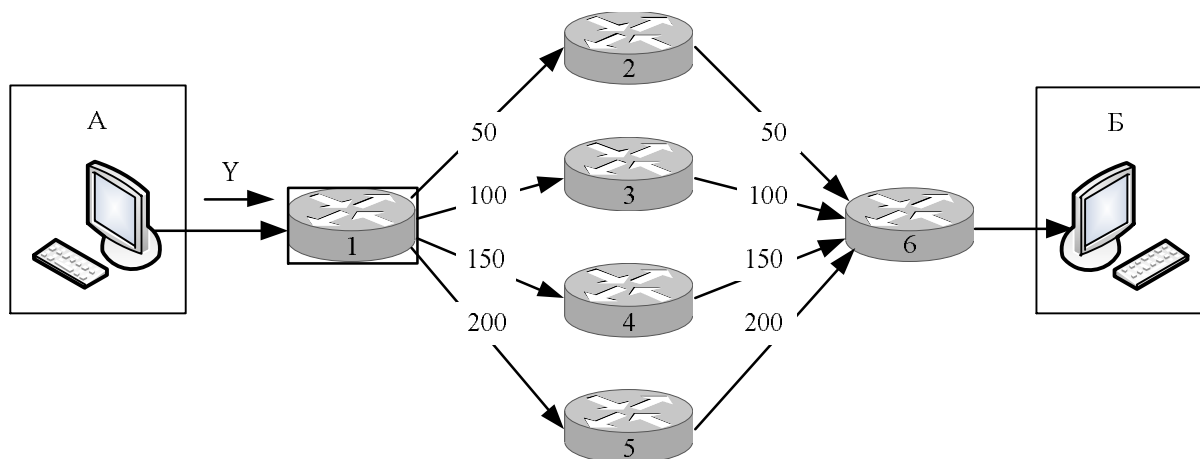


Рис. 2. Топология сети

### Результаты моделирования

В рамках приведенной модели при заданных начальных условиях были получены результаты моделирования, приведенные в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что максимальная производительность сети при разных величинах входной интенсивности поступающей нагрузки достигалась при разных значениях диагональных элементов матрицы  $R$ , однако прослеживается явная пропорциональная зависимость с незначительными отклонениями. Обобщая полученные результаты можно сделать вывод по рекомендациям в выборе величин значений диагональных элементов матрицы  $R$ , а именно каналу связи с максимальной пропускной способностью присваивать значение 1, а остальным пропорционально отношению их пропускной способности к пропускной способности канала со значением 1.

Также из полученных результатов видно, что при низкой загруженности локального участка использование методов БН не дает выигрыша по сравнению с маршрутизацией по кратчайшему пути.

При средней загруженности локального участка применения метода ЛДМ дает высокий выигрыш, если же интенсивность поступления нагрузки часто изменяется, то более рационально перейти к динамическому перерасчету переменных управления. В случае высокой загруженности локального участка, оправдан отказ от использования методов БН, поскольку оптимальное распределение на выходе одного маршрутизатора без постоянного учета загруженности последующих линий и узлов связи может приводить к перегрузке, а значит потере данных. Выходом из такой ситуации могло бы послужить применение централизованной системы управления, однако такие решения пока не адаптированы к практике.

### Заключение

В работе проанализирована задача балансировки нагрузки и варианты ее решения в IP-сетях. Разработаны рекомендации о выборе величин значений диагональных элементов матрицы  $R$ , с целью достижения максимальной производительности работы сети.

Таблица 2

Результаты моделирования

		Интенсивность поступления трафика					
Параметры	$B$ , Mb/s	$Y = 70$ , Mb/s	$Y = 170$ , Mb/s	$Y = 270$ , Mb/s	$Y = 370$ , Mb/s	$Y = 470$ , Mb/s	$Y = 500$ , Mb/s
diag(R)	50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	100	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
	150	0,75	0,7	0,75	0,8	0,7	0,75
	200	1	1	1	1	1	1
$\bar{u}$	50	0,16	0,31	0,514	0,75	0,92	0,99
	100	0,14	0,39	0,64	0,75	0,92	0,99
	150	0,13	0,33	0,514	0,70	0,98	0,99
	200	0,13	0,31	0,514	0,75	0,92	0,99
Pkn, %	100%	13,65%	33,15%	52,65%	72,15%	91,65%	97,50%

Определены рекомендации по выбору режимов работы метода ЛДМ при различных входных интенсивностях поступающей нагрузки

Результаты исследования эффективности метода ЛДМ в дальнейшем будут использоваться для разработки метода автоматического выбора режимов работы ЛДМ. Полная автоматизация работы методов БН позволит упростить работу сетевых администраторов и повысить эффективность функционирования сети.

### Литература

1. Medhi, D. *Network routing: algorithms, protocols, and architectures [Text]* / D. Medhi, K. Ramasamy. - Morgan Kaufmann Series in Networking: Elsevier Digital Press, 2007. - 788 p.
2. Воробьев, А.В. *Анализ состояния и перспективы развития маршрутизации сетей передачи данных [Текст]* / А.В. Воробьев, В.И. Кортунов, А.А. Акулиничев // *Радиотехника*. - 2010. - Вып. 163. - С. 136-142.

3. Воробьев, А.В. *Динамическая модель сети передачи данных для решения задач маршрутизации [Текст]* / А.В. Воробьев, В.И. Кортунов // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. - 2011. - № 2 (50). - С. 32-36.

4. Остерлох, Х. *Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка [Текст]* / Х. Остерлох. - СПб.: ВНУ-СПб., 2002. - 512 с.

5. Кортунов, В.И. *Решение задачи распределения нагрузки на основе динамической модели маршрутизатора [Электронный ресурс]* / В.И. Кортунов, А.В. Воробьев // *Проблемы телекоммуникацій*. - 2011. - № 2 (4). - С. 128 - 138. - Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_kortunov\\_router.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_kortunov_router.pdf). - 15.12.2011 г.

6. Поповский, В.В. *Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний [Текст]* / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // *Наукові записки УНДІЗ*. - 2009. - № 1 (9). - С. 3 - 26.

7. *Справочник по теории автоматического управления [Текст]* / Год ред. А.А. Красовского. - М.: Наука, 1987. - 712 с.

Поступила в редакцию 5.12.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Прием, передача и обработка сигналов» А.В. Тоцкий, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ЛОКАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

*А.В. Воробйов*

Проаналізовано задачу балансування навантаження. Показано необхідність переходу від статичних методів балансування навантаження до динамічних. Розглянуто метод локальних динамічних моделей для розв'язання задач балансування навантаження. Проведено дослідження ефективності розглянутого методу на однопродуктовій мережі. Запропоновано рекомендації щодо вибору режимів роботи методу. Запропоновано рекомендації щодо особливостей застосування методу локальних динамічних моделей у випадках не стаціонарності інтенсивності вхідного навантаження в мережі.

**Ключові слова:** маршрутизація, оптимізація, динамічне управління, балансування навантаження, розподіл ресурсів, моделювання.

## RESEARCH PERFORMANCE OF THE METHOD LOCAL DINAMIC MODELS

*A.V. Vorobyov*

The problem of load balancing is analyzed. The necessity of the transition from static methods to dynamic load balancing. The method local dynamic models for the solution of problems of load balancing is considered. The research of the performance of this method for a single-network is performed. Recommendations on the choice of modes of operation of the method is proposed. Recommendations on local features of the method dynamic models incases, not steady-state intensity of the incoming load on the network is proposed.

**Keywords:** routing, optimization, dynamic control, load balancing, resource allocation, simulation.

**Воробьев Андрей Васильевич** - аспирант каф. «Прием, передача и обработка сигналов» Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: and\_vorobey@hotmail.com.