

УДК 004.7:681.51

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАТОРА



[В.И. КОРТУНОВ](#),

[А.В. ВОРОБЬЕВ](#)

Национальный аэрокосмический
университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Проаналізована задача балансування навантаження в IP мережах рівня доступу. Запропоновано метод локальних динамічних моделей, що здійснює балансування між маршрутами з різною метрикою. Проведено моделювання роботи однопродуктової мережі із застосуванням запропонованого методу.

In the paper the problem of load balancing in the IP networks of access layer is analyzed. The method of local dynamic models carrying the balancing between routes with different metrics is proposed. The network with the proposed method is simulated.

Проанализирована задача балансировки нагрузки в IP сетях уровня доступа. Предложен метод локальных динамических моделей, осуществляющий балансировку между маршрутами с разной метрикой. Проведено моделирование работы однопродуктовой сети с применением предложенного метода.

Введение

Эффективность функционирования телекоммуникационной системы (ТКС) во многом определяется решением задач маршрутизации. В большинстве случаев маршрутизация предусматривает два этапа выполнения действий: подготовительный и собственно сам процесс маршрутизации [1]. 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 априори. При имеющихся недостатках полностью децентрализованного и централизованного управления, возникает потребность в объединении их положительных особенностей [2].

В такой ситуации возникает необходимость в новых методах, которые позволят обеспечить эффективность распределения нагрузки, а также будут совместимыми 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. Такой подход позволяет также уменьшить размерность модели и обеспечить требуемую сходимость. Некоторые попытки реализовать данный подход привели к созданию методов балансировки нагрузки.

I. Особенности решения задач балансировки нагрузки в современных маршрутных протоколах

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 (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. Различают статическую и динамическую БН. В случае использования статической балансировки пропорции распределения нагрузки не изменяются во время работы маршрутизатора. Такой подход является довольно простым, но малоэффективным, целесообразнее использовать динамическую балансировку, которая предусматривает перераспределение нагрузки во время работы [3].

В большинстве случаев для реализации распределения нагрузки в протоколах маршрутизации используют алгоритм *Round-robin*, основанный на переборе по круговому циклу. Так, по умолчанию протоколы *OSPF*, *RIP*, *EIGRP* поддерживают балансировку нагрузки между четырьмя маршрутами с равной метрикой. В зависимости от того, как маршрутизатор обрабатывает пакет, БН может выполняться по-пакетно (*per-packet*) или по-получателю (*per-destination*) [4].

Если же маршруты не являются полностью равноценными, распределение трафика между ними в большинстве случаев не происходит. Исключением является протокол *EIGRP*, который осуществляет БН между маршрутами с разной метрикой, однако при этом он требует выполнения ряда соответствующих условий. Эти условия далеко не всегда могут быть удовлетворены, и, как следствие, альтернативные маршруты не будут использованы [5]. Сравнение реализации балансировки нагрузки в протоколах *OSPF*, *RIP*, *EIGRP* показано в табл. 1.

Еще одним существенным недостатком существующих методов БН является то, что балансировка между альтернативными маршрутами осуществляется без учета текущей загрузки. Так, если один из маршрутов будет перегружен, то пакеты все равно будут посылаться по нему.

В последнее время появляется ряд работ, как например [6, 7, 8], посвященных решению некоторых из вышеприведенных вопросов. Однако 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, в особенности для маршрутов с разной стоимостью и учета динамики.

Таблица 1. Сравнение протоколов *OSPF*, *EIGRP* и *RIP* по реализации балансировки нагрузки

Протокол маршрутизации	БН между маршрутами с одинаковой метрикой	БН между маршрутами с разной метрикой	по-пакетно (per-packet)	по-получателю (per-destination)
<i>OSPF</i>	+	-	+	+
<i>EIGRP</i>	+	+	+	+
<i>RIP</i>	+	-	+	+

Таким образом, ставится задача разработки метода распределение нагрузки между маршрутами с разной метрикой, учитывающего загрузку каналов, по которым проводится распределение. В связи с этим возникает также необходимость в разработке соответствующей динамической модели маршрутизатора, которая ляжет в основу разрабатываемого метода.

II. Метод распределения нагрузки для задач маршрутизации

Основной сложностью в решении поставленной задачи является то, что при условии разной стоимости маршрутов трудно добиться выполнения требований касательно качества обслуживания. Нужно также помнить, что сеть представляет собой сложный распределенный объект, предсказать однозначное поведение которого в последующий момент времени не представляется возможным. В большинстве случаев гарантированное качество обслуживания может быть обеспечено только при выделении виртуального канала, который предполагает наличие одного маршрута с требуемыми показателями производительности [9]. В сети к тому же существуют приоритетные пакеты, которые также будут пересылаться по кратчайшему пути. В таких условиях возникает ситуация, когда альтернативные маршруты (если они имеют разную стоимость) будут недогружены, а обеспечить равномерную загрузку сети можно будет лишь пакетами, которые не будут чувствительны к параметрам качества обслуживания. По этим причинам предлагаемый метод будет применим только для трафика, не требующего гарантированной доставки. Поскольку равномерной загрузки сети можно достичь только в случае дейтаграммной передачи, то подход будет основан на по-пакетной (*per-packet*) обработке.

Основными отличительными особенностями предлагаемого метода от большинства существующих являются то, что он динамический, а также позволяет распределять нагрузку в зависимости от состояния каналов между альтернативными маршрутами с разной стоимостью. Метод распределения нагрузки предлагается реализовывать как дополнение к существующим протоколам маршрутизации, которые помимо таблиц маршрутизации поддерживают топологические таблицы и располагают дополнительными сведениями, отображающими состояние каналов. Процесс маршрутизации с учетом предлагаемого метода БН по маршрутам с разной стоимостью представлен графически на рис. 1:

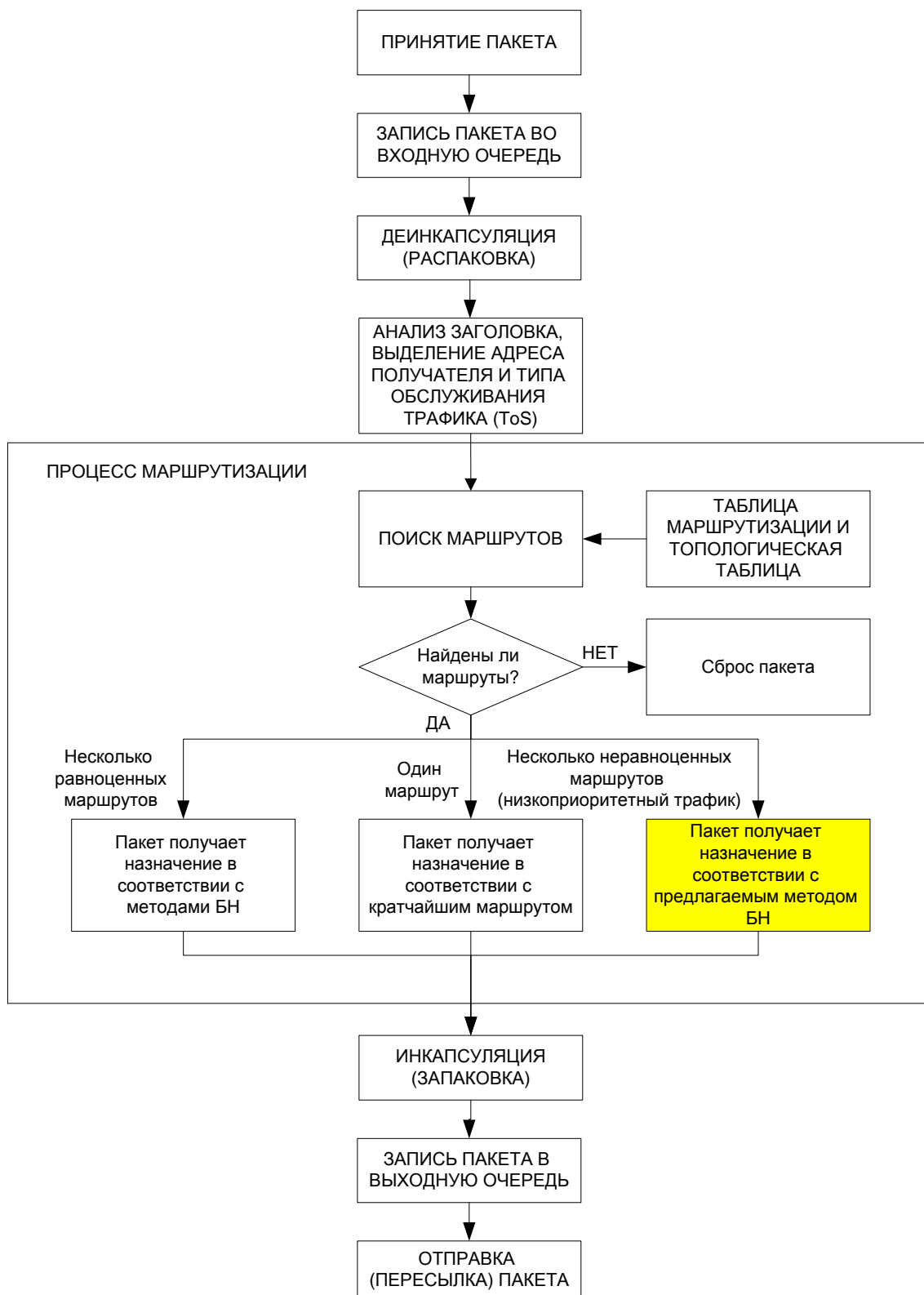


Рис. 1. Описание процесса маршрутизации с учетом предлагаемой модификации

Динамическая модель маршрутизатора

Для эффективного исследования и решения поставленной задачи распределения нагрузки важно адекватно математически описать работу маршрутизатора. Такая математическая модель должна отображать функциональную сторону работы маршрутизатора, а для принятия решений по управлению должна быть подкреплена информацией о структуре и функционировании сети (или локального участка сети). Эта информация, как правило, содержится в топологической таблице маршрутизатора.

Для описания структуры сети целесообразно применение ориентированного взвешенного графа, вершины которого $V_i, i = \overline{1, N}$ моделируют узлы, как правило, маршрутизаторы ТКС, а дуги $E_{i,j}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j$, – каналы связи, где N – количество узлов сети. Так, основной характеристикой i -го узла является объем его буферной памяти x_i^{\max} , а канала связи $E_{i,j}$ – его пропускная способность $c_{i,j}$.

В сущности маршрутизатор представляет собой накопитель (интегратор) с набором входов, через которые поступает трафик, и набором выходов, через которые трафик пересылается к следующим сетевым устройствам. Поэтому модель маршрутизатора будем рассматривать как динамическую. Анализ динамических моделей для решения задач управления в ТКС, проведенный в [10, 11], показывает, что наиболее подходящим описанием является модель в форме пространства состояний.

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 обслуживания которого имеется несколько маршрутов. В качестве управляющих выберем балансировочные переменные, которые соответствуют частям пропускной способности тех интерфейсов маршрутизатора, между которыми осуществляется БН. Такой выбор переменных состояния и управления не случаен, и он успешно используется для ряда других задач управления ТКС, но с несколько другими физическими интерпретациями, вкладываемыми в переменные состояния и управления.

Количество уравнений для описания работы отдельного 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; $b_{i,l}(k) = c_{i,l}(k)\Delta t$; $c_{i,l}(k)$ – пропускная

способность канала связи (интерфейса маршрутизатора) $E_{i,l}$, через который выполняется распределение нагрузки за вычетом пропускной способности, уже отведенной под другие задачи; $u_{i,l}^j(k)$ – доля пропускной способности канала $E_{i,l}$, 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 ; Δt – 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

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

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

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

где $\bar{x}(k)$ – вектор переменных состояния (объемы буферов маршрутизатора); $\bar{u}(k)$ – вектор переменных входа (балансировки нагрузки); $\bar{y}(k)$ – 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.

Формулировка локальной модели

Вышеприведенную динамическую модель маршрутизатора (1)-(3), описывающую БН между выходящими из него каналами связи на своем локальном участке сети, будем в дальнейшем называть локальной динамической моделью. Таких маршрутизаторов в сети может быть несколько, а потому предлагаемый метод БН соответственно назовем методом локальных динамических моделей (ЛДМ). В совокупности применение локальных динамических моделей позволит достичь более сбалансированного распределения трафика по всей сети и соответственно более высоких показателей производительности.

Критерий оптимальности решения задачи распределения нагрузки

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 [12]. Так, в качестве критерия оптимизации для решения задачи распределения нагрузки на маршрутизаторе выбираем минимум квадратичного функционала

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

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

Этот критерий был выбран по аналогии с [10], поскольку он отображает оценку качества управления в процессе поиска решения по распределению нагрузки и затраты ресурсов на реализацию этого управления, что наиболее соответствует содержанию решаемой задачи. Физически функционал (4) характеризует суммарную стоимость использования ресурсов маршрутизатора и каналов связи, выходящих из него в процессе решения задачи балансировки нагрузки. При этом первое слагаемое определяет затраты по использованию буферного устройства маршрутизатора, а второе – количественно отображает стоимость использования канальных ресурсов на выходящих интерфейсах маршрутизатора.

III. Реализация метода локальных динамических моделей

На основе предложенной динамической модели маршрутизатора было проведено моделирование работы однопродуктовой сети и решена задача балансировки нагрузки. Топология сети показана на рис. 2:

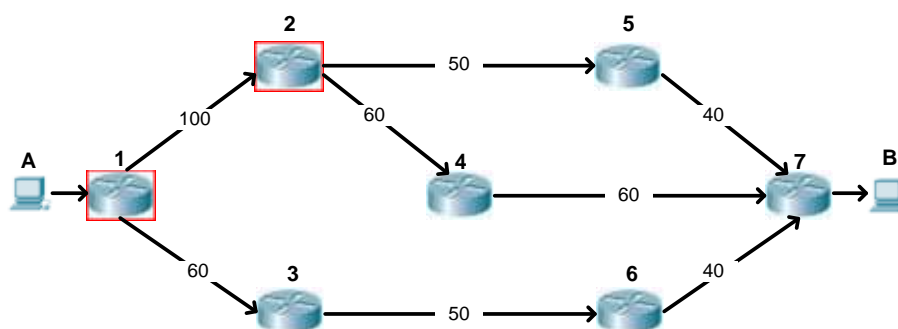


Рис. 2. Топология моделируемой сети

Сеть состоит из передающего (формирует поступающую нагрузку на сеть в виде безприоритетного трафика) и принимающего абонентов (A и B), семи маршрутизаторов и восьми каналов связи с соответствующими величинами их пропускных способностей (Мбит/с). При этом функции маршрутизации в основном возлагались на

маршрутизаторы 1 и 2 (выделены рамками на рисунке), которые описывались предложенной математической моделью (3) с учетом ограничений (2) и выполняли балансировку нагрузки согласно (4). Общее время моделирования (T_M) составляло 100 с, которое изменялось дискретно с шагом $\Delta t = 1$ с.

Поскольку предлагаемый метод работает для трафика, не требующего гарантированной доставки, то полагали, что в сеть поступает трафик только такого типа и весь он направлен от маршрутизатора 1 к маршрутизатору 7. Так как процесс поступления нагрузки в сеть являлся случайным, то и задавался он интенсивностью поступления пакетов $y(k)$ (Мбит/с), распределенной по нормальному закону. Условно для примера $y(k)$ была выбрана с параметрами $M[y(k)] = 70$, $D[y(k)] = 25$.

Математические модели маршрутизаторов

Маршрутизатор 1. Из маршрутизатора 1 к маршрутизатору 7 ведут два непересекающихся маршрута, а именно $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ и $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 7$. Матрицы B , A , Q , R для модели первого маршрутизатора обозначим как $B1$, $A1$, $Q1$, $R1$, а сами пусть имеют следующий вид:

$$B1 = [100 \ 60], \quad A1 = [1], \quad Q1 = [1], \quad R1 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}, \quad y_{1,7}(k) = y(k).$$

В итоге модель можно записать так:

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

Маршрутизатор 2. Из маршрутизатора 2 к маршрутизатору 7 ведут два маршрута, а именно $2 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ и $2 \rightarrow 4 \rightarrow 7$. По аналогии с вышеприведенной моделью матрицы $B2$, $A2$, $Q2$, $R2$ для модели второго маршрутизатора имеют следующий вид:

$$B2 = [50 \ 60], \quad A2 = [1], \quad Q2 = [1], \quad R2 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}.$$

В итоге получаем модель

$$x_{2,7}(k+1) = [1] \cdot x_{2,7}(k) - [50 \ 60] \cdot \begin{bmatrix} u_{2,4}^7(k) \\ u_{2,5}^7(k) \end{bmatrix} + [100] \cdot [u_{1,2}^7(k)].$$

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, предложенным в [13]:

- 1) Нормированный объем поступившей нагрузки в сеть ($Y_{\text{вхн}}$, %):

$$Y_{\text{вх н}} = \frac{\sum_{k=1}^K Y_{\text{вх}\Sigma}(k)}{\Delta t \sum_{k=1}^K C(k)} 100\%,$$

где $Y_{\text{вх}\Sigma}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{\text{вх}i,j}(k)$ – величина суммарной нагрузки, поступающей в сеть на k -м интервале; $y_{\text{вх}i,j}(k)$ – объем нагрузки, поступающей к узлам сети; $C(k)$ – пропускная способность сети на k -м интервале.

2) Нормированный объем вышедшей нагрузки из сети ($Y_{\text{вых н}}, \%$):

$$Y_{\text{вых н}} = \frac{\sum_{k=1}^K Y_{\text{вых}\Sigma}(k)}{\Delta t \sum_{k=1}^K C(k)} 100\%,$$

где $Y_{\text{вых}\Sigma}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{\text{вых}i,j}(k)$ – величина суммарной нагрузки, обслуженной сетью на k -м интервале; $y_{\text{вых}i,j}(k)$ – объем нагрузки, обслуженной на отдельном узле сети.

3) Нормированное значение производительности сети ($P_H, \%$):

$$P_H = \frac{\sum_{k=1}^K P(k)}{\sum_{k=1}^K C(k)} 100\%,$$

где $P(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c_{i,j}(k) u_{i,j}^j(k)$ – производительность сети на k -м временном интервале.

4) Нормированный коэффициент использования отдельных канальных ресурсов сети ($K_{i,j н}$):

$$K_{i,j н} = \frac{\sum_{k=1}^K K_{i,j}(k)}{K},$$

где $K_{i,j}(k) = \frac{c_{i,j}(k) u_{m,i}^j(k)}{C(k)}$ – коэффициент использования отдельных канальных ресурсов.

5) Нормированный коэффициент использования канальных ресурсов сети в целом ($K_{\text{исп н}}$):

$$K_{\text{исп н}} = \frac{\sum_{k=1}^K K_{\text{исп}}(k)}{K},$$

где $K_{\text{исп}}(k)$ – коэффициент использования канальных ресурсов сети на k -м интервале.

Результаты моделирования

В рамках приведенной модели при заданных начальных условиях были получены результаты моделирования, приведенные в табл. 2. Нормированный показатель производительности за все время моделирования при использовании предлагаемого метода БН составил $P_H = 39\%$, а при использовании методов БН, используемых в протоколах RIP и OSPF, $P_H = 17\%$. Из полученных результатов видно, что ТКС успешно справляется с поступающей нагрузкой и равномерно распределяет ее с соблюдением заданных ограничений.

Таблица 2. Результаты моделирования

Методы БН	Показатели производительности сети							
	$Y_{вх\ n}$, %	$Y_{вых\ n}$, %	P_H , %	$K_{исп\ n}$	$K_{1,2\ n}$	$K_{1,3\ n}$	$K_{2,4\ n}$	$K_{2,5\ n}$
Методы БН, используемые в протоколах RIP, OSPF	14.9	4.7	17.3	0.33	0.9	0	0.9	0
Метод локально динамических моделей	14.9	11.9	39.2	0.78	0.83	0.6	0.81	0.78

Выводы

В работе проанализирована задача балансировки нагрузки и варианты ее решения в IP-сетях уровня MAN для протоколов OSPF, RIP и EIGRP, в ходе чего было установлено, что БН по маршрутам с разной стоимостью в этих протоколах не решается, исключением является только протокол EIGRP и далеко не для всех случаев.

В статье предложен метод ЛДМ для решения задачи БН. Новизна метода состоит в том, что он в отличие от используемых в протоколах маршрутизации OSPF, RIP учитывает динамику изменения загрузки буфера и интерфейсов маршрутизатора. Он осуществляет также БН между маршрутами с разной метрикой. В общем случае предлагаемый метод БН может быть применен в качестве надстройки над существующими протоколами маршрутизации, реализованными в маршрутизаторе.

Проведено моделирование работы маршрутизатора на основе предложенной модели в рамках однопродуктовой сети. По полученным результатам сделан вывод о том, что управление на основе предложенной модели успешно решает задачу балансировки нагрузки, равномерно загружая все доступные каналы связи, тем самым повышая показатели производительности сети в целом.

Для дальнейшего усовершенствования метода ЛДМ предстоит решить вопросы балансировки для учета всех видов трафика и дополнения метода обработкой re-destination, а также проведения исследований на полнопродуктовой сети.

Список литературы:

1. *Medhi D., Ramasamy K.* Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann Series in Networking: Elsevier Digital Press, 2007. – 788 p.
2. *Кортунов В.И., Воробьев А.В., Акулиничев А.А.* Моделирование сети передачи данных с учетом задержек и приоритетности // Матеріали міжнародної наукової конференції “МОДЕЛЮВАННЯ-2010”: Зб. наук. праць. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2010. – Том 1. С. 239 – 242.
3. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. - СПб.: BHV-СПб., 2002. – 512 с.
4. *Сайед Фараз Шамим.* Как работает средство балансировки нагрузки? [Электронный ресурс] // Cisco Systems, Inc. – Jan 05, 2010. – Режим доступа к журн.: <http://www.cisco.com/support/RU/customer/content/9/92036/46.shtml>.
5. *Сайед Фараз Шамим.* Как работает распределение нагрузки с неравной стоимостью путей в IGRP и EIGRP? [Электронный ресурс] // Cisco Systems, Inc. – Jan 05, 2010. – Режим доступа к журн.: <http://www.cisco.com/support/RU/customer/content/9/92116/19.shtml>.
6. *Kandula S., Katabi D., Sinha S., Berger Arthur.* Dynamic load balancing without packet reordering // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2007. – Vol. 37, №2. – P. 51–62.
7. *Susitaival R., Aalto S.* Adaptive load balancing with OSPF // HET-NETs 2004. – 2004. – P. 9/1-9/10.
8. *Antic M., Smiljanic A.* Oblivious routing scheme using load balancing over shortest paths // IEEE ICC 2008. – 2008. – P. 5783-5787.
9. *Вегенша Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
10. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний// Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – №1(9). – С.3 – 26.
11. *Воробьев А.В., Кортунов В.И., Акулиничев А.А.* Анализ состояния и перспективы развития маршрутизации сетей передачи данных // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2010. – Вып. 163. – С. 136-142.
12. *Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского.* М.: Наука, 1987. – 712 с.
13. *Евсеева О.Ю.* Методы адаптивной маршрутизации в гибридных телекоммуникационных сетях с гарантированным качеством обслуживания: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.12.02, Укр. гос. академия железнодорожного транспорта – Х., 2004. – 20 с.