

УДК 621.391

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАЛАНСИРОВКИ БУФЕРНЫХ И КАНАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ



[А.В. ЛЕМЕШКО,](#)

[Д.В. СИМОНЕНКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Запропонована динамічна модель балансування буферних та каналних ресурсів транспортної мережі телекомунікаційної системи (ТКС). Модель представлена системою лінійних різницевих рівнянь стану ТКС.

In this article we propose a dynamic model of balancing the buffer and channel resources of transport network (TN) is proposed this model is represented as a system of linear difference equations state TN.

Предложена динамическая модель балансировки буферных и каналных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы (ТКС). Модель представлена системой линейных разностных уравнений состояния ТКС.

Введение

Преобладающей тенденцией в развитии современных архитектур обеспечения качества обслуживания (*Quality of Service, QoS*) в транспортных сетях (ТС) телекоммуникационных систем (ТКС) является реализация идей сбалансированного использования всех доступных сетевых ресурсов, к которым, прежде всего, стоит отнести буферную емкость маршрутизаторов и пропускную способность каналов связи ТКС. Подтверждением тому могут служить появившиеся и интенсивно развивающиеся концепции и технологии многопутевой маршрутизации (*MultiPath Routing*), инжиниринга трафика (*Traffic Engineering*) и сбалансированной маршрутизации (*Load-Balancing Routing*) [1–3]. На практике это вылилось в то, что возможности существующих маршрутизирующих протоколов также расширены в области балансировки нагрузки. При этом протокол *RIP* выполняет балансировку нагрузки по маршрутам с равной стоимостью (метрикой), а в протоколах *IGRP, EIGRP* и *OSPF*, кроме того, поддерживается функция балансировки нагрузки по маршрутам с различной стоимостью. Это требует дополнительной, достаточно трудоемкой и основанной на эвристике настройки сетевого оборудования, которая осуществляется преимущественно вручную путем проверки условий пригодности маршрутов на основе анализа их метрики с административно назначаемым множителем (*variance*), определяющего максимально допустимое отклонение «длины» используемых маршрутов от «длины» кратчайшего пути [4, 5].

Проблема обеспечения балансировки сетевых ресурсов неоднократно затрагивалась во многих работах, например в [6–9]. Однако немаловажно отметить, что в ранее предлагаемых решениях не производился учет динамики изменения состояния ТКС – загруженности ее каналных и буферных ресурсов. Причина тому состояла в использовании статических моделей ТКС, представленных либо графовым опи-

санием [6, 7], либо (в лучшем случае) алгебраическими уравнениями состояния сети [8, 9]. Отсутствие учета высокой динамики процессов информационного обмена в ТКС, как правило, компенсируется периодическим перерасчетом управляющих воздействий во времени, что, однако, лишь в немногoм компенсировало потери в эффективности получаемых решений по балансировке сетевых ресурсов и обеспечения качества обслуживания в целом. В этой связи актуальной представляется задача, связанная с разработкой динамических моделей балансировки буферных и канальных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы.

I. Структурная модель телекоммуникационной системы

В общем случае для описания структурной модели ТКС целесообразно применение графовых моделей, так как именно графовое описание структуры сети обладает большей степенью простоты и наглядности. ТКС целесообразно представлять в виде управляющей и управляемой подсистем. В качестве управляемой подсистемы зачастую выступает транспортная сеть, а в качестве управляющей – совокупность средств управления и контроля. Поэтому структурную модель ТКС можно представить в виде взвешенного графа, который включает в себя два основных типа подграфов: подграфы ТС $G(V, D)$ (рис. 1) и системы управления сетью $G'(V', D')$.

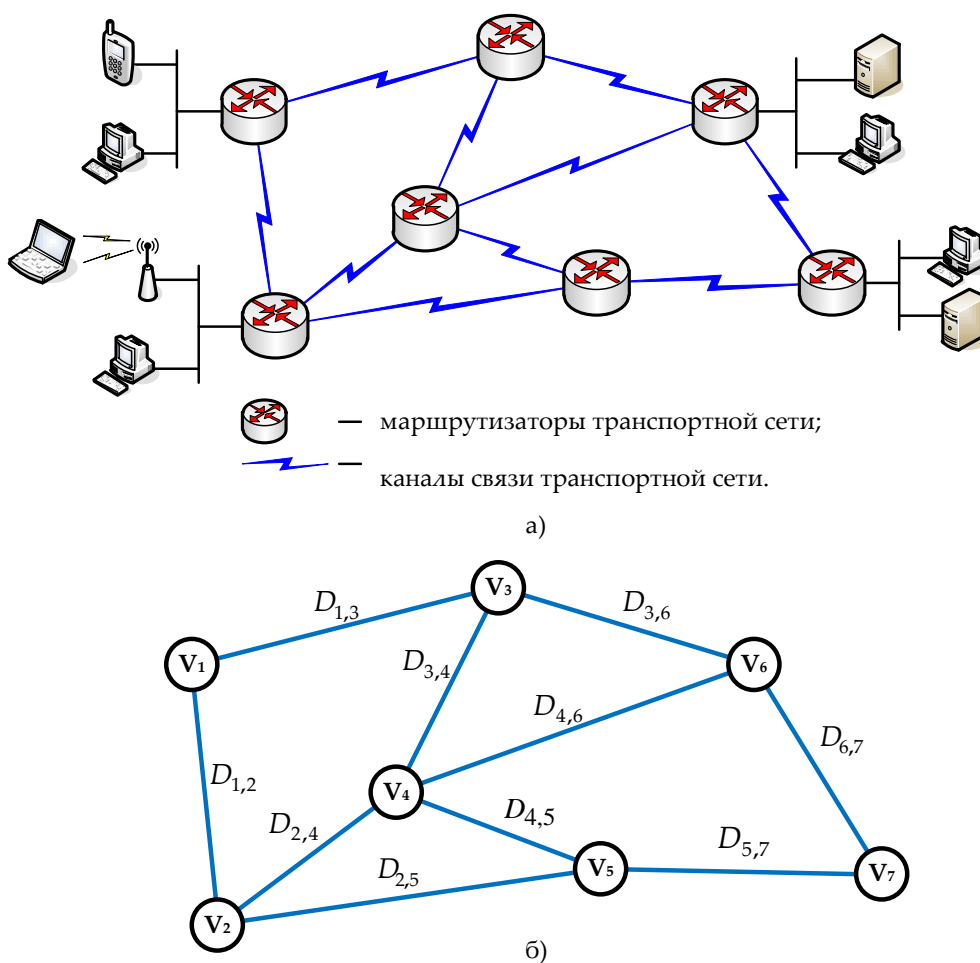


Рис. 1. Пример структуры транспортной сети (а) и ее графового представления (б)

Зачастую для описания структурной модели ТС с дуплексными каналами связи используется неориентированный взвешенный граф $G(V, D)$, где множество вершин графа V соответствует множеству маршрутизаторов ТС, а множество ребер D соответствует множеству трактов передачи, связывающих маршрутизаторы ТКС. Пусть общее количество маршрутизаторов в ТС составляет M .

В рамках разрабатываемой модели принималось, что основной характеристикой маршрутизаторов сети $V_i \in V$ ($i = \overline{1, M}$) является объем буферных ресурсов, а основными характеристиками каналов связи $D_{i,j} \in D$ ($i, j = \overline{1, M}, i \neq j$), соединяющих маршрутизаторы V_i и V_j , являются их пропускные способности $c_{i,j}$.

Система управления сетью также описывается в виде неориентированного взвешенного графа $G'(V', D')$, где V' является множеством центров управления (серверов маршрутов), а множество D' представляет собой совокупность служебных каналов связи, которые используются для обмена информацией о состоянии ТС и передачи команд управления. Учитывая тот факт, что структура системы управления зачастую строится на базе ТС, графы $G(V, D)$ и $G'(V', D')$ могут совпадать частично или полностью.

II. Динамическая модель балансировки сетевых ресурсов

В ходе функционального описания ТКС в рамках динамических моделей хорошо зарекомендовал себя подход, основанный на использовании дифференциальных или разностных уравнений ее состояния [10, 11]. Тогда динамику информационного обмена в ТКС можно представить в виде следующей системы неавтономных уравнений загрузки буферов очередей на маршрутизаторах ТС [11]:

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

где $b_{m,i}(k) = c_{m,i}(k) \cdot \Delta t$; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k) \cdot \Delta t$, ($k=0,1,2,\dots$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$); $x_{i,j}(k)$ – объем данных, находящихся на маршрутизаторе V_i и предназначенных для передачи маршрутизатору V_j в момент времени t_k , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния; $c_{i,j}(k)$ – пропускная способность канала связи $D_{i,j}$ в момент времени t_k ; $u_{i,l}^j(k)$ – доля пропускной способности канала $D_{i,l}$, выделенная пользовательскому трафику с адресом V_j в момент времени t_k и трактуемая в дальнейшем как управляющая переменная, характеризующая распределение канальных ресурсов; $\zeta_{i,j}(k)$ – средняя интенсивность поступления данных на маршрутизатор V_i в момент времени t_k с адресом V_j от пользователей сети; Δt – период (таймер) перерасчета управляющих переменных, который в современных маршрутизирующих протоколах составляет десятки секунд (для протокола RIP – 30 с, для протокола IGRP – 90 с).

В уравнении (1) слагаемые $\sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^M b_{i,l}(k)u_{i,l}^j(k)$ и $\sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i,j}}^M b_{m,i}(k)u_{m,i}^j(k)$ определяют объемы

данных, которые убывают или поступают в очередь $x_{i,j}$ от соседних маршрутизаторов в соответствии с динамической стратегией управления сетевыми ресурсами. Приведенные слагаемые непосредственно отвечают за распределение канального ресурса между трафиками пользователей, а также согласно выражению (1) определяют порядок использования буферного ресурса маршрутизаторов ТС.

На переменные состояния, а также переменные управления сетевыми ресурсами с целью предотвращения перегрузки элементов ТС должен быть наложен ряд ограничений [10, 11]. Ввиду ограниченности величины буферов очередей на маршрутизаторах ТС на переменные состояния накладываются ограничения, которые в отличие от ранее известных решений [10, 11], имеют следующий вид:

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

где $x_{i,j}^{\max}$ – емкость программного буфера очереди на маршрутизаторе V_i для пакетов трафиков, передаваемых на маршрутизатор V_j ; $\alpha(k)$ – верхний динамически управляемый предел использования буферного пространства маршрутизаторов ТС, то есть $\alpha(k)$ является управляющей переменной наряду с переменными $u_{i,l}^j(k)$.

На практике буфер на маршрутизаторах разделяют на два типа: аппаратный и программный. Максимальный объем аппаратного буфера на маршрутизаторах, как правило, составляет два пакета на каждом интерфейсе. Данный тип буфера всегда работает по алгоритму FIFO. Программный же буфер ограничивается объемом оперативной памяти маршрутизатора и может быть изменен административно (вручную). Зачастую его размер устанавливается равным нескольким десяткам пакетов. Так, например, для алгоритма приоритетного обслуживания (PQ) для четырех поддерживаемых очередей их максимальная емкость по умолчанию составляет 20, 40, 60 и 80 пакетов соответственно.

С целью предотвращения перегрузки каналов связи ввиду ограниченности их пропускных способностей на переменные $u_{i,l}^j(k)$ накладываются ограничения вида:

$$0 \leq u_{i,l}^j(k); \quad \sum_{n=1}^M u_{i,l}^n(k) \leq \beta(k) \leq 1, \quad (3)$$

где $\beta(k)$ – верхний предел использования пропускной способности трактов передачи телекоммуникационной сети, то есть $\beta(k)$ является динамически управляющей переменной наряду с $\alpha(k)$ и $u_{i,l}^j(k)$.

III. Критерии оптимальности балансировки сетевых ресурсов

Важным этапом в разработке математической модели балансировки сетевых ресурсов является обоснование критериев оптимальности получаемых решений. При этом вид критерия, с одной стороны, должен максимально учитывать физику

решаемой задачи, а, с другой стороны, обеспечивать приемлемую трудность (вычислительную сложность) в получении конечных решений.

В рамках описанной динамической модели функционирования ТКС (1)-(3) задача по управлению сетевыми ресурсами может быть сформулирована как задача их оптимальной балансировки, связанная с использованием следующего критерия:

$$J = \min_{x,u,\alpha,\beta} \sum_{k=1}^a (r_{\alpha}(k)\alpha(k) + r_{\beta}(k)\beta(k)), \quad (4)$$

где r_{α} и r_{β} – весовые коэффициенты, которые характеризуют условную стоимость балансировки по буферным и канальным ресурсам сети.

Использование критерия (4) позволяет реализовать свойство прогнозирования при управлении сетевыми ресурсами, т.е. обеспечивает балансировку ресурсов с учетом нагрузки, которая ожидается в следующие периоды времени Δt . Учитывая тот факт, что существуют ошибки прогнозирования, которые, как правило, увеличиваются с ростом номера интервала k в интервале прогнозирования $T = (a-1)\Delta t$, в критерии (4) важно предусмотреть уменьшение весовых (штрафных) коэффициентов с увеличением номера итерации k , то есть $r(k) > r(k+1)$.

Кроме того, особенностью вышеизложенной модели (1)-(4) балансировки сетевых ресурсов является наличие в критерии (4) слагаемых $r_{\alpha}(k)\alpha(k)$, при отсутствии которых данная модель приобрела бы вид динамической модели балансировки лишь канальных ресурсов. Но в этом случае отсутствие контроля над текущим состоянием очередей на маршрутизаторах ТС может, в конечном счете, привести к неоправданной загрузке буферных ресурсов, за счет чего будет достигаться минимизация максимальной загрузки канальных ресурсов. В этой связи и возникает потребность во введении в критерий слагаемого, отвечающего за использование буферных ресурсов, благодаря чему повышается, в том числе, и практическая значимость получаемых конечных решений. С целью предотвращения перегрузок буферных ресурсов в «угоду» разгруженности каналов связи рекомендуется $r_{\alpha}(k) \gg r_{\beta}(k)$. В целом выбор отношения коэффициентов $r_{\alpha}(k)$ и $r_{\beta}(k)$ является достаточно сложной самостоятельной задачей и требует проведения дополнительных исследований.

IV. Пример решения задачи динамической балансировки сетевых ресурсов в транспортной сети ТКС

С целью повышения наглядности вышепредложенной модели (1)-(4) продемонстрируем решение задачи балансировки сетевых ресурсов для структуры ТС, состоящей из пяти узлов и семи каналов связи (рис. 2). Максимальный объем буферного пространства на каждом маршрутизаторе условно выбирался равным 100 бит. В разрывах каналов связи указаны их пропускные способности. Для примера к обслуживанию сетью были приняты два трафика, которые передавались между маршрутизаторами 1 и 5 (200 Кбит/с), 3 и 4 (150 Кбит/с). Таймер перерасчета управляющих переменных (Δt) составлял 1 с. Распределение сетевых ресурсов, полученное в ходе решения оптимизационной задачи (4), показано на рис. 2.

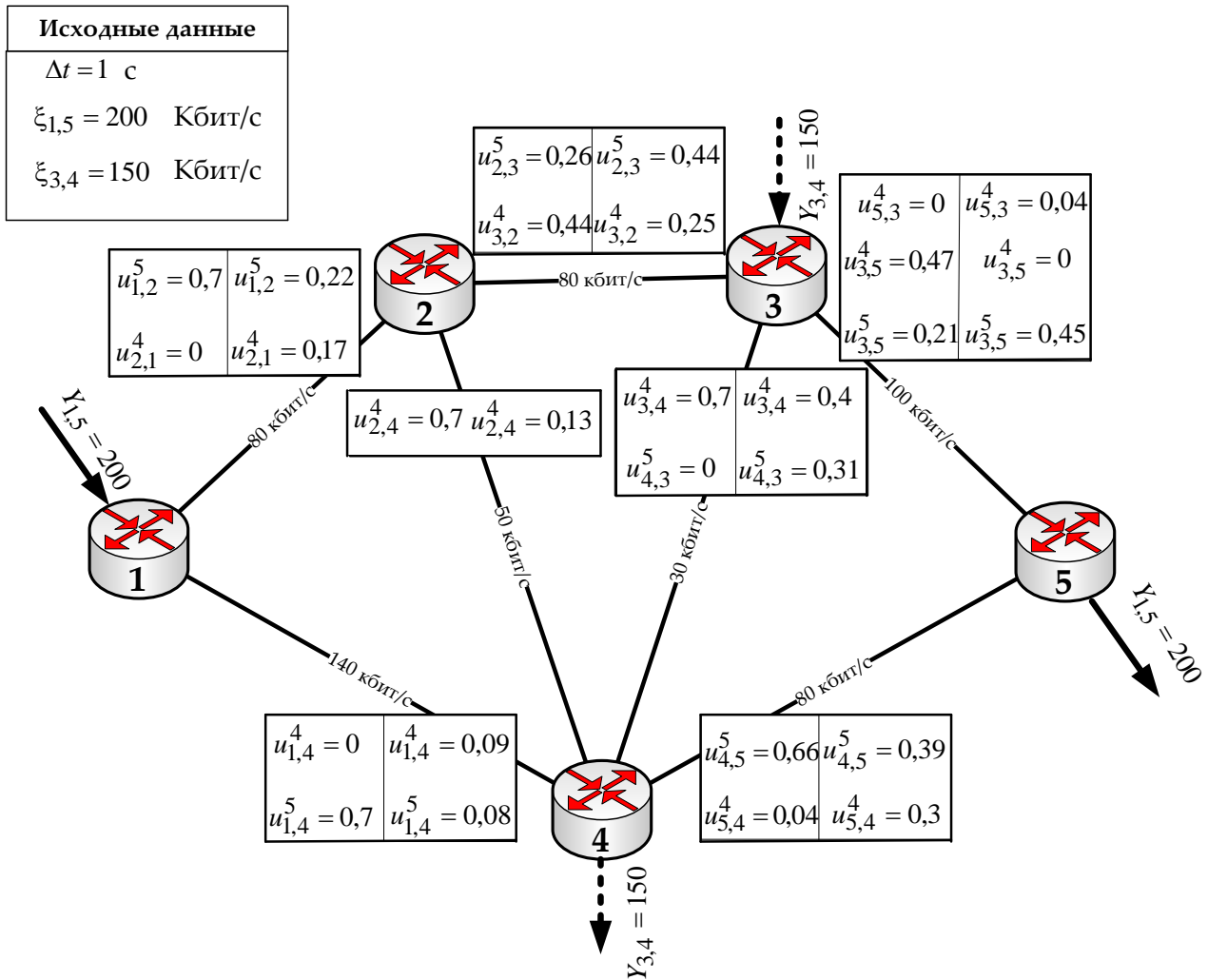


Рис. 2. Распределение канальных ресурсов, полученное в ходе решения задачи балансировки сетевых ресурсов

Стоит отметить, что в ходе проведения исследований использовалось два временных интервала прогнозирования ($a = 2$), соответственно значения переменных управления $u_{i,l}^j$ выведены в двух колонках (рис. 2): в первой – для $k = 1$, а во второй – для $k = 2$. В ходе решения оптимизационной задачи (4) были получены значения коэффициентов $\alpha(k)$ и $\beta(k)$ (рис. 3), которые определяют максимальный порог использования буферных и канальных ресурсов соответственно. С целью недопущения перегрузки буферных ресурсов значения весовых $r_\alpha(k)$ и $r_\beta(k)$ выбирались равными 100 и 1 соответственно.

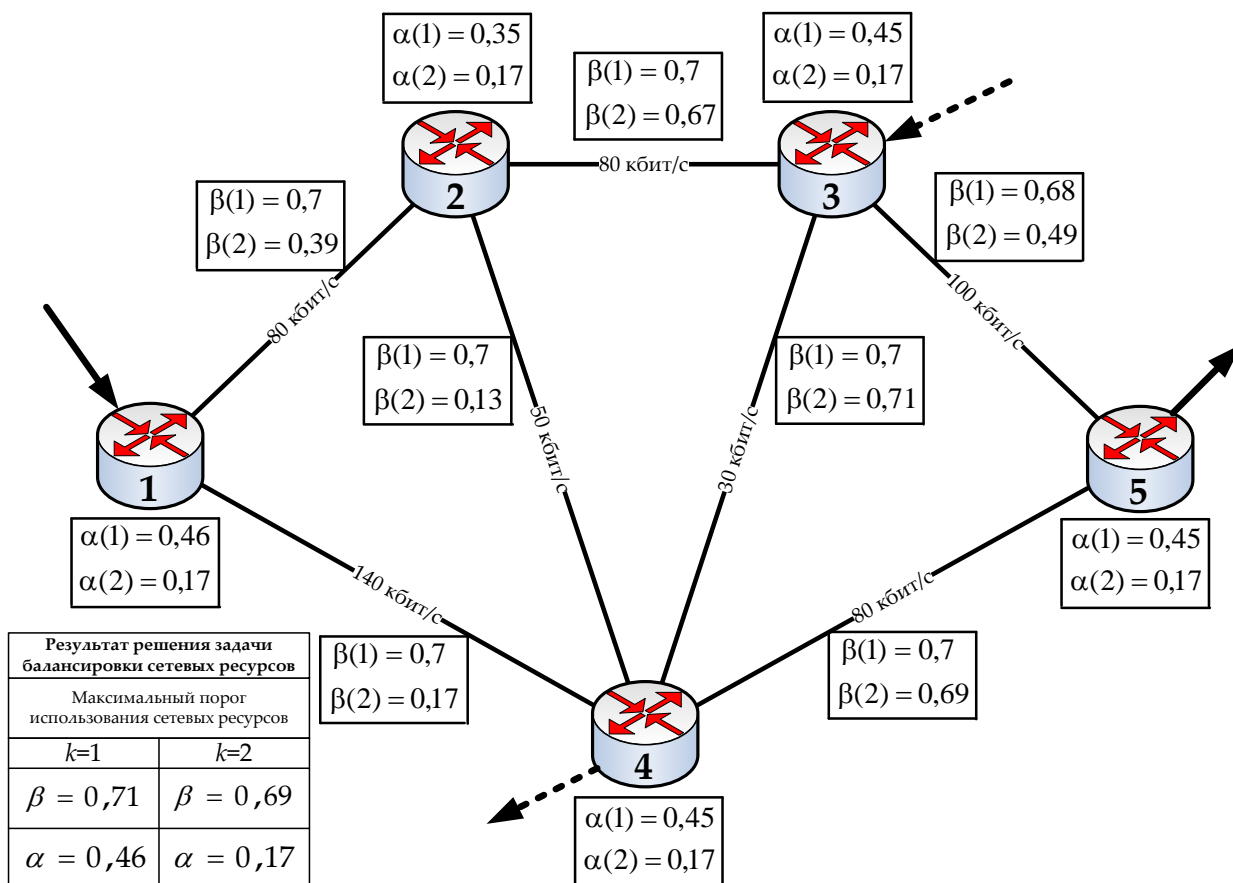


Рис. 3. Результат решения задачи по балансировке буферных и канальных ресурсов сети

По результатам расчетов (рис. 3) было установлено, что в ходе балансировки сетевых ресурсов при обслуживании двух трафиков, передаваемых между маршрутизаторами 1 и 5, 3 и 4, удалось на первом временном интервале (Δt) загрузить буферную емкость маршрутизаторов не более чем на 46%, а пропускную способность каналов связи не более чем на 71%, а на втором временном интервале работы модели загрузка сетевых ресурсов удалось несколько снизить до 17% и 69% соответственно.

Выводы

В статье предложена динамическая модель балансировки буферных и канальных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы (ТКС). Модель представлена системой линейных неавтономных управляемых разностных уравнений состояния ТКС (1). При этом в качестве переменных состояния выступали текущие размеры (загруженность) очередей на маршрутизаторах транспортной сети. Благодаря введенным условиям предотвращения перегрузки очередей и пропускной способности каналов связи (2), (3), а также форме критерия оптимальности получаемых решений (4), задача управления сетевыми ресурсами была сведена к задаче их оптимальной балансировки.

Модель относится к классу динамических потоковых моделей и учитывает основные характеристики сети (структуру и пропускные способности каналов связи) и параметры обслуживаемого трафика (интенсивность). Данная модель имеет ряд преимуществ, к которым можно отнести следующие: учет динамического характера информационного обмена, протекающего в ТКС; обеспечение динамической балансировки канальных и, что немаловажно, буферных ресурсов, а также наличие свойств прогнозирования, что напрямую приводит к предотвращению перегрузок. Модель может быть положена в основу перспективных технологий управления сетевыми ресурсами – протоколов маршрутизации, алгоритмов управления очередями и распределения пропускной способности каналов связи, отвечающих передовым концепциям в этой области – *MultiPath Routing*, *Traffic Engineering* и *Load-Balancing Routing*.

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. *Simha A., Osborne E.* Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. – 608 p.
3. *Uyless D. Black.* IP routing protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco routing protocols: Prentice Hall PTR, 2000. – 287 p.
4. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.Пб.: BHV. С.Пб., 2002. – 512 с.
5. *Руденко И.* Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей. – М.: КУДИС-ОБРАЗ, 2003. – 656 с.
6. *Vutukury S.* Multipath routing mechanisms for traffic engineering and quality of service in the Internet // PhD Dissertation. University of Kalifornia, 2001. – 152 p.
7. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J.* MDVA: A Distance-Vector Multipath Routing Protocol // Proc. IEEE INFOCOM. Anchorage. – 2001. – P. 557–564.
8. *Pioro M., Medhi D.* Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks. Morgan Kaufmann Series in Networking: Elsevier Digital Press, 2000. – 794 p.
9. *Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya.* Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. – 2001. – Vol.2., №1. – P. 348–353.
10. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data communications networks // IEEE Trans. on communications. – 1975. – Vol. 25, №1. – P.85–95.
11. *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.