

МУЛЬТИТЕНЗОРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕШЕНИЯ МАРШРУТНЫХ ЗАДАЧ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ МНОПРОДУКТОВЫМИ МНОГОПОЛЮСНЫМИ МОДЕЛЯМИ ЕВКЛИДОВОГО ПРОСТРАНСТВА

А.В. Лемешко, канд. техн. наук

Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

В статье проведено синтез метода многопутевой маршрутизации нескольких разнотипных пользовательских трафиков, передаваемых между множеством узлов телекоммуникационной сети. Метод основывается на мультитензорном представлении многопродуктовой многополюсной модели сети связи.

* * *

У статті проведено синтез методу багатошляхової маршрутизації декількох різнотипних трафіків користувачів, що передаються між множиною вузлів телекомунікаційної мережі. Метод базується на мультитензорному представленні багатопродуктової багатополюсної моделі мережі зв'язку.

* * *

In the article the synthesis of a method of multipath routing of several varied user's traffics transmitted between set of nodes of a telecommunication network is carried out. The method is based on multitensor representation of multiproduct multipolar model of a telecommunication network.

Введение

Маршрутизация всегда была и остается действенным средством преодоления трудностей, связанных с несовершенством проектных решений, обусловленных, в свою очередь, сложностью учета высокой динамики изменения состояния телекоммуникационной сети (ТКС), нестационарного характера поступления на обслуживание информационных трафиков пользователей, а также стохастичности процессов наращивания или деградации структуры сети. Становление стратегий маршрутизации происходило эволюционным путем, и в зависимости от уровня требований пользователей и степени технологического развития связанного оборудования они претерпели развитие от статических (фиксированных) планов до динамических (адаптивных) решений. Отличительной особенностью развития современных телекоммуникационных технологий является пересмотр основных идей и принципов маршрутизации, которые заложены в соответствующие модели, методы и, в конечном итоге, в маршрутизирующие протоколы. В соответствии с динамикой требований пользователей в настоящее время каче-

ство протоколов маршрутизации в немалой степени оценивается с точки зрения их способности обеспечивать предоставление услуг связи гарантированного качества средствами сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем.

Оценка современных решений по обеспечению качества связи

Несмотря на ряд критических прогнозов, технология пакетной коммутации *ATM (Asynchronous Transfer Mode)* остается лидером на рынке предоставления услуг связи гарантированного качества в территориально-распределенных ТКС [1]. В рамках этой технологии, реализующей режим виртуальных соединений, для обеспечения заданного качества связи необходимые сетевые ресурсы резервируются вдоль одного кратчайшего в рамках принятых критериев маршрута. Для решения данной задачи используются возможности маршрутизирующего и одновременно сигнального протокола *PNNI (Private Network – to – Network Interface)*, относящегося к классу протоколов однопутевой маршрутизации.

Особенно примечательным является подход к обеспечению заданного уровня качества обслужи-

вания *QoS (Quality of Service)* в сетях *IP (Internet Protocol)*, относящихся к классу дейтаграммных сетей и составляющих в последние годы заметную конкуренцию *ATM*-сетям. В *IP*-сетях в настоящее время используются две архитектурные модели обеспечения *QoS* – интегрированные услуги *IntServ (Integrated Services)* и дифференцированные услуги *DiffServ (Differentiated Services)* [3], но лишь первая из них с помощью сигнального протокола резервирования сетевых ресурсов *RSVP (Resource Reservation Protocol)* обеспечивает гарантированное качество обслуживания из конца в конец каждого трафика пользователя в масштабах сети. С реализацией модели *IntServ* в *IP*-сетях пришлось отказаться от дейтаграммного режима передачи и многопутевой стратегии маршрутизации, для которых решение задачи обеспечения *QoS* заметно усложняется. На фоне широкого разнообразия протоколов маршрутизации, нашедших свою реализацию в современных *IP*-сетях [2; 3], особо выделяются протоколы состояния связей – протоколы *OSPF (Open Shortest Path First)* и *IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System)*, т.к. лишь они с различной степенью сложности смогли адаптироваться к новым требованиям, связанных с обеспечением *QoS*.

К классу комплексных или гибридных решений также можно отнести создание и внедрение технологии многопротокольной коммутации меток *MPLS (MultiProtocol Label Switching)*, развивающей модель *IP-over-ATM* путем трансформации обычных *IP*-сетей в сети виртуальных соединений, наделенных механизмами *QoS*. При этом переход к режиму виртуальных соединений [3; 4] сопровождался сохранением основных *IP*-протоколов маршрутизации – *OSPF* и *IS-IS*, в функции которых стало входить теперь расчет маршрута доведения не для каждого пакета, а для сообщения в целом.

В основу маршрутизирующих протоколов *OSPF* и *PNNI* положены графовые модели и комбинаторные решения задачи кратчайшего пути с по-

мощью алгоритма Дейкстры (*Dijkstra*). В результате работы данных протоколов в технологиях *IP/IntServ*, *ATM* и *MPLS* для обслуживания каждого конкретного трафика рассчитывается единственный путь – кратчайший в выбранной метрике, вдоль которого сравнительно легко можно обеспечить резервирование необходимых сетевых ресурсов – канальной и буферной емкости. Однако подобный подход, как показала практика [4], все чаще стал провоцировать возникновение перегрузочных явлений даже при имеющихся свободных сетевых ресурсах, т.к. с перегрузкой кратчайшего пути множеством передаваемых трафиков, большинство обходных путей (маршрутов) остается неиспользованным, что не может не сказаться на общей производительности ТКС. Основная причина подобного рода перегрузок кроется в том, что при выборе (расчете) искомого маршрута не учитывалась текущая загрузка сети.

Для устранения подобного дисбаланса предложена концепция *TE (Traffic Engineering)*, реализация которой направлена на обеспечение сбалансированной загрузки всех имеющихся сетевых ресурсов. В частности, в технологии *MPLS TE* [2; 4] кроме традиционных параметров метрики – работоспособность и пропускная способность, для решения маршрутных задач в протоколы *OSPF* и *IS-IS* включены новые типы объявлений для распространения по сети информации о номинальной и нерезервированной (доступной) пропускной способности каждого тракта передачи. Решение задачи определения маршрута с учетом ограничений получило название *Constrained-based Routing*, а протокол *OSPF* с соответствующим расширением – *Constrained OSPF* или *CSPF*. Такие же расширения коснулись и протоколов *IS-IS* и *RSVP*, которые уже прописаны рабочей группой по инженерным проблемам сети *IETF (Internet Engineering Task Force)* в виде соответствующих рабочих документов (*Internet Draft*) [4].

В настоящее время в производимом телекоммуникационном оборудовании принят вариант

MPLS TE с последовательным рассмотрением информационных трафиков пользователей, подлежащих обслуживанию сетью. Но так как последовательный поиск путей снижает качество маршрутных задач, внимание разработчиков сконцентрировано на получении решений, основанных на одновременном анализе множества трафиков, что позволит, в конечном итоге, получить более рациональную загрузку ресурсов сети и, как результат, обеспечить более высокую производительность ТКС.

Таким образом, преобладающей тенденцией в становлении и развитии моделей предоставления услуг связи гарантированного качества является использование в том или ином виде режима виртуальных соединений с реализацией однопутевой стратегии маршрутизации. При этом выбор подобного подхода к обеспечению *QoS* обусловлен не столько его высокой эффективностью, сколько отсутствием приемлемых приложений *QoS*-решений в действующих сетях с многопутевой маршрутизацией (МПМ), которые по определению способны обеспечить более высокую производительность ТКС. В этой связи особую актуальность приобрела задача разработки результативных моделей и методов многопутевой маршрутизации, способных обеспечить адекватную формализацию решения маршрутных задач в ТКС с обеспечением заданного качества связи одновременно множеству разнородных трафиков пользователей, передаваемых между различными парами «отправитель-получатель».

Решение выше сформулированной задачи в рамках графовых моделей и комбинаторных методов, оптимизированных под однопродуктовые двухполюсные сети, с ростом числа трафиков (продуктов) в сети наталкивается на ряд серьезных трудностей описательного и вычислительного характера. И если в процессе передачи трафика путем его отклонения от кратчайшего пути удастся загрузить сеть в целом [5], то вопрос контроля качества вдоль каждого из вновь рассчитанных путей остается откры-

тым. По этой причине в предлагаемой работе будет осуществлено решение поставленной задачи в рамках тензорного подхода, хорошо себя зарекомендовавшего при описании как многопродуктовых двухполюсных [6], так и многопродуктовых многополюсных сетей как моделей ТКС [7].

Мультитензорная модель многопродуктовой многополюсной сети

Под многопродуктовой многополюсной сетью (ММС) будет пониматься модель ТКС, обслуживающей одновременно несколько пользовательских трафиков (продуктов) между множеством пар узлов (полюсами) сети. В качестве основы математического описания телекоммуникационной сети будет принята мультитензорная модель ММС [7], предполагающая задание структуры ТКС одномерной ортогональной сетью [8; 9]. Множество сетевых узлов подобной сети составляют маршрутизаторы, где m – их общее количество, а множество ветвей сети моделирует n трактов передачи в ТКС.

В рамках ортогонального представления тензорной модели ТКС структура сети определяет анизотропное пространство, образованное ветвями сети, размерность которого численно равна количеству ветвей. Совокупность независимых путей в сети – замкнутых (контуров) и разомкнутых (узловых пар) образует системы координат [8; 9], в связи с чем такие пути будут именоваться базисными или координатными. Преобразование структуры сети с сохранением численности ветвей или переход от одной совокупности независимых контуров и пар узлов к другой трактуется как преобразование системы координат. Каждый путь ввиду своей независимости определяет в рамках введенного пространства координатную ось, а каждая структура – свою систему координат (СК).

Во введенном пространстве модель ММС может быть представлена в виде геометрического объекта смешанного измерения – мультитензора [6; 9]

$$G = G^{(1)} \otimes \dots \otimes G^{(z)} \otimes \dots \otimes G^{(Z)}, \quad (1)$$

компоненты которого определяются как

$$G^{(z)} = H_{(1)}^{(z)} \otimes H_{(2)}^{(z)} \otimes \dots \otimes H_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes H_{(K(z))}^{(z)} \otimes T_{(1)}^{(z)} \otimes T_{(2)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(K(z))}^{(z)}, \quad (2)$$

где \otimes – знак тензорного умножения; $K(z)$ – общее количество информационных трафиков, циркулирующих между z -й парой узлов при рассмотрении ТКС как ММС.

Выражение (2) определяет смешанный тензор $G^{(z)}$ валентности $2K(z)$: $K(z)$ раз ковариантный и $K(z)$ раз контравариантный, компоненты которого представляют собой одновалентные контравариантные и ковариантные тензоры соответственно

$$H_{(k)}^{(z)} = \begin{bmatrix} h_{1k}^{(z)} \\ h_{2k}^{(z)} \\ \vdots \\ h_{nk}^{(z)} \end{bmatrix} \text{ и } T_{(k)}^{(z)} = \begin{bmatrix} \tau_{1k}^{(z)} \\ \tau_{2k}^{(z)} \\ \vdots \\ \tau_{nk}^{(z)} \end{bmatrix} \quad (k = \overline{1, K(z)})$$

где координаты $h_{ik}^{(z)}$ характеризуют величину информационной загрузки координатных путей сети протекающим между z -й парой узлов k -м трафиком, измеряемой в единицах трафика (ед. т), а координаты $\tau_{ik}^{(z)}$ отражают величину временных задержек этого же трафика в базисных путях сети.

Переход к мультитензорному представлению ММС продиктован рядом причин. Во-первых, часто порядок выбора искомой СК представления тензора для каждой группы трафиков, передаваемых между различными парами узлов сети, может значительно различаться. Различие между подобными СК состоит в различной нумерации вершин; контуров и узловых пар, выступающих в роли координатных осей. Благодаря подобному подходу удается получить искомые зависимости в аналитическом виде. Во-вторых, характерно, когда обслуживание трафиков

z -й пары узлов может осуществляться посредством заранее определенного множества ветвей $n^{(z)}$ ($n^{(z)} \leq n$), определяющих в исходном пространстве размерности n z -е подпространство размерности $n^{(z)}$. Сеть со структурой, отвечающей z -му подпространству рассмотрения тензора $G^{(z)}$, будет именоваться z -сетью. Таким образом, каждый из тензоров $G^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$) задается в своем z -м подпространстве, образованном соответствующими ветвями z -сети. Уменьшение размерности таких подпространств соответствует понижению размерности соответствующих тензоров и их компонентов, что приводит к снижению вычислительной сложности тензорных моделей и методов анализа и синтеза ТКС как многопродуктовой многополюсной сети.

Функциональный аспект моделируемой ТКС можно отразить системой инвариантных уравнений поведения сети [6; 8]

$$H_{(k)}^{(z)} = L_{(k)}^{(z)} T_{(k)}^{(z)} \quad (z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K(z)}), \quad (3)$$

где $L_{(k)}^{(z)}$ – дважды контравариантный метрический тензор z -го подпространства, координаты $l_{ik}^{(z)}, j_k^{(z)}$ ($i, j = \overline{1, n^{(z)}}$) которого численно характеризуют величины пропускных способностей базисных путей сети, выделенных для обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов, и измеряются в ед. т/с.

В соответствии с постулатом второго обобщения Г. Крона [9] инвариантность системы уравнений (3) позволяет получить целостное представление о свойствах ТКС на основе ее многоаспектного анализа. При этом каждый аспект отвечает принятой к рассмотрению системе координат представления тензора $G^{(z)}$. В зависимости принятой СК каждое из уравнений системы (3) принимает вид частного векторно-матричного уравнения, сохраняя размерность входящих в него величин. Сложность решения задач может быть снижена за счет удачного выбора

систем координат представления мультитензора (1) как модели ТКС, в рамках которых система функциональных уравнений (3) имела бы простейший вид. Обычно выбору необходимой СК соответствует поиск в рамках принятых инвариантов сети простейшей структуры, которая в терминах понятийного аппарата тензорного анализа сетей носит название примитивной [8; 9]. В качестве примитивной выбирается сеть, состоящая из отдельных разомкнутых между собой ветвей, что соответствует выбору ортогональной системы координат рассмотрения тензора (2), в которой проекцией метрического тензора является матрица диагональной структуры.

Структуре примитивной сети отвечает система функциональных векторно-матричных уравнений

$$H_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} = L_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} T_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} \quad (z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K_{(z)}}), \quad (4)$$

где $H_{(k)\mathcal{E}}^{(z)}$, $T_{(k)\mathcal{E}}^{(z)}$ и $L_{(k)\mathcal{E}}^{(z)}$ – проекции тензоров $H_{(k)}^{(z)}$, $T_{(k)}^{(z)}$ и $L_{(k)}^{(z)}$ в СК ветвей сети.

Матрица $L_{(k)\mathcal{E}}^{(z)}$ в выражении (4) имеет диагональную форму, ненулевые элементы которой равны пропускным способностям ветвей сети, выделенных для обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов. В свою очередь, реальной структуре сети соответствует система координат, где в качестве осей выступало множество независимых контуров и пар узлов (КПУ). В данной системе координат система инвариантных уравнений (3) имеет вид

$$H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} = L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \quad (z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K_{(z)}}), \quad (5)$$

где $H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$, $T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ и $L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ – проекции тензоров $H_{(k)}^{(z)}$, $T_{(k)}^{(z)}$ и $L_{(k)}^{(z)}$ в СК КПУ.

Характер тензоров в выражениях (3-5) подтверждается законами их координатного преобразования при переходе от одной СК к другой [6; 8]

$$H_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} = C_{(z)} H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}; \quad (6)$$

$$T_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} = A_{(z)} T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}; \quad L_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} = C_{(z)} L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} C_{(z)}^t;$$

$$L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} = A_{(z)}^t L_{(k)\mathcal{E}}^{(z)} A_{(z)}, \quad (7)$$

где матрицы координатного преобразования $C_{(z)}$ и $A_{(z)}$ связаны условием ортогональности

$$C_{(z)}^t A_{(z)} = I_{(z)}, \quad (8)$$

а $I_{(z)}$ – единичная матрица размерности $n^{(z)} \times n^{(z)}$, $[\cdot]^t$ – символ транспонирования.

В виду независимости значений компонент метрического тензора от пространственного положения геометрического объекта $G^{(z)}$, т.е. от значений его координат $H_{(k)}^{(z)}$ и $T_{(k)}^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K_{(z)}}$), а также от $C_{(z)}$ и $A_{(z)}$, рассматриваемое пространство относится к классу евклидовых.

Для последующего анализа ортогональной тензорной модели ТКС каждое уравнение системы (5) представляется в компаунд-тензорном виде [8; 9]

$$\begin{bmatrix} H_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \text{-----} \\ H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \text{-----} & | & \text{-----} \\ \langle 3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \text{-----} \\ T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $H_{(k)\kappa}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ – контурные слагаемые, а $H_{(k)n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)n.y}^{(z)}$ – узловые слагаемые векторов $H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}$ соответственно, т.е.

$$\begin{bmatrix} H_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \text{-----} \\ H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = H_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}; \quad \begin{bmatrix} T_{(k)\kappa}^{(z)} \\ \text{-----} \\ T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = T_{(k)\kappa.n.y}^{(z)};$$

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \text{-----} & | & \text{-----} \\ \langle 3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}.$$

Размерность слагаемых $H_{(k)\kappa}^{(z)}$ и $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ равна $r^{(z)}$ и

отвечает количеству в z -сети независимых контуров. Размерность узловых слагаемых $H_{(k)n,y}^{(z)}$ и $T_{(k)n,y}^{(z)}$ соответствует числу в z -сети независимых пар узлов и равна $s^{(z)}$, что на единицу меньше, чем общее количество узлов в z -сети. При этом справедливо тождество [9]

$$n^{(z)} = r^{(z)} + s^{(z)}.$$

В качестве интегральной характеристики тензорной модели ТКС, наряду с ее частными характеристиками, может выступить диагональная матрица пропускных способностей ветвей сети L_g размерности $n \times n$, элементы которой количественно характеризуют величины пропускных способностей ветви сети. На величины координат матрицы L_g должно быть наложено ограничение вида

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^{K(z)} F^{(z)} L_{(k)g}^{(z)} \leq L_g, \quad (10)$$

где $F^{(z)}$ – матрица пересчета сетевых характеристик из ортогональной системы координат (СК ветвей) z -го подпространства рассмотрения тензора $G^{(z)}$ как модели МДС в единую ортогональную СК ветвей сети размерности $n^{(z)} \times n$.

Формулировка условий резервирования сетевых ресурсов для обеспечения QoS

Основополагающим этапом обеспечения QoS при решении маршрутных задач в ММС является формулировка условий резервирования сетевых ресурсов. Решение этой задачи усложнено необходимостью одновременного учета особенностей обслуживания разнотипных пользовательских трафиков, передаваемых между различными парами узлов сети. Разнотипность проявляется не только в различных направлениях передачи трафиков, но и в необходимости предоставления дифференцированных услуг связи, т.к. объемы обслуживаемых трафиков, их приоритетность и запрашиваемые гарантии каче-

ства связи могут существенно различаться.

При обслуживании каждого конкретного пользовательского трафика должно заключаться отдельное соглашение, которое, в сущности, является соглашением между пользователем и сетью на интерфейсе "пользователь-сеть" по следующим основным пунктам [1; 3]:

- параметры трафика, определяющие характеристики потока данных источника;
- качество обслуживания, предоставляемое сетью;
- правила проверки соответствия реальных параметров трафика источнику заявленным;
- определение сетью соединения, предоставляемого для транспортирования трафика.

К основным параметрам k -го пользовательского трафика, передаваемого между z -й парой узлов, относятся его объем – $h_{(k)mpb}^{(z)}$ или интенсивность поступления – $y_{(k)}^{(z)}$. Качество обслуживания сетью того же трафика может оцениваться требуемым временем передачи трафика – $\tau_{(k)mpb}^{(z)}$.

В рамках предлагаемой мультитензорной модели ТКС параметры пользовательских трафиков задаются в виде соответствующих координат векторов $H_{(k)k.n.y}^{(z)}$ и $T_{(k)k.n.y}^{(z)}$. Причем, выбор СК независимых контуров и пар узлов путем их соответствующей нумерации необходимо осуществлять таким образом, чтобы выполнялся следующий ряд условий. Во-первых, в каждой z -й сети первой координате вектора $H_{(k)n,y}^{(z)}$ должна соответствовать величина пользовательского трафика, поступающего в сеть или убывающего из нее через узел «отправитель» или «получатель» соответственно, т.е. $h_{(k)mpb}^{(z)}$. Во-вторых, остальные $s^{(z)} - 1$ координат того же вектора, оставаясь нулевыми, должны относиться к неактивным узлам, т.е. к узлам, через которые осуществляется лишь транзит трафика. Подобный выбор СК представления каждого из тензоров

$G^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$) определяет в качестве первой координаты вектора $T_{(k)n.y}^{(z)}$ требуемое время обслуживания k -го трафика между z -й парой узлов, т.е. $\tau_{(k)mp\delta}^{(z)}$.

При решении задачи многопутевой маршрутизации в качестве исходных данных задаются величины доступных пропускных способностей ветвей сети, представленные координатами матрицы L_θ . Неизвестным же является порядок их распределения между каждым из информационных трафиков, принятым сетью к обслуживанию, т.е. в результате решения задачи необходимо рассчитать координаты матриц $L_{(k)\theta}^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$, $k = \overline{1, K(z)}$) с выполнением условий неравенства (10).

С целью устранения контуров (петель) в рассчитываемых маршрутах передачи того или иного трафика координаты векторов $T_{(k)\kappa}^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$, $k = \overline{1, K(z)}$) приравняются к нулю. По этой причине, согласно выражению (9), имеет место соотношение

$$H_{(k)n.y}^{(z)} = \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} T_{(k)n.y}^{(z)},$$

которое можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \\ \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \\ \langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где

$$\begin{bmatrix} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \\ \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = H_{(k)n.y}^{(z)}; \quad \begin{bmatrix} \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \\ \langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = T_{(k)n.y}^{(z)};$$

$$\begin{bmatrix} \langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \\ \langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} & | & \langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \end{bmatrix} = \langle 4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)}.$$

В выражении (11) в рамках выбранной СК имеем

$$\begin{aligned} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= h_{(k)mp\delta}^{(z)}; \quad \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} = 0; \\ \langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} &= \tau_{(k)mp\delta}^{(z)}, \end{aligned}$$

а компонент $\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)}$ считается неизвестной величиной.

Согласно выражению (11) можно получить систему двух матричных уравнений

$$\begin{aligned} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right) + \\ &+ \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right); \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right) + \\ &+ \left(\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right). \quad (13) \end{aligned}$$

Равенство нулю вектора $\langle 2 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)}$ позволяет из уравнения (13) получить выражение для расчета вектора $\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)}$, т.е.

$$\langle 2 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} = - \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right),$$

подставляя которое в уравнение (12), вид последнего приобретает форму

$$\begin{aligned} \langle 1 \rangle H_{(k)n.y}^{(z)} &= \left(\langle 4/1 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} - \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right]^{-1} \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)\kappa.n.y}^{(z)} \right) \right) \left(\langle 1 \rangle T_{(k)n.y}^{(z)} \right). \quad (14) \end{aligned}$$

В конечном итоге условие предоставления сети требуемой полосы пропускания k -му трафику, передаваемому между z -й парой узлов, за счет резервирования необходимых сетевых ресурсов согласно выражению (14) приобретает вид

$$\begin{aligned} & \left[\langle 4/1 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} - \left(\langle 4/2 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} \right) \left[\langle 4/4 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} \right]^{-1} \times \right. \\ & \left. \times \left(\langle 4/3 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} \right) \geq \left(\langle 1 \rangle H_{(k)п.у}^{(z)} \right) / \left(\langle 1 \rangle T_{(k)п.у}^{(z)} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Важно отметить, что получить в аналитическом виде условия резервирования (15) удалось лишь благодаря мультитензорному описанию многопродуктовой многополюсной модели ТКС, где для представления каждого из тензоров $G^{(z)}$ выбиралась выше описанным образом своя СК. Тензорное же описание основывается на единой системе координат представления тензора G и его компонент $G^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$), что делало бы невозможным дальнейшее упрощение выражения (11).

Тензорный метод многопутевой маршрутизации в телекоммуникационной сети

Основываясь на сформулированных выше условиях резервирования сетевых ресурсов можно определить следующий метод многопутевой маршрутизации с поддержкой услуг связи гарантированного качества в ТКС, представленной многопродуктовой многополюсной моделью.

В соответствии с предлагаемым методом МПМ, во-первых, производится анализ характеристик информационных трафиков пользователей, требований к их обслуживанию. Осуществляется агрегирование трафиков, передаваемых между одними и теми же узлами сети.

Во-вторых, определяются величины пропускных способностей ветвей сети, подлежащих резервированию для обслуживания каждого из трафиков пользователей, путем расчета матриц $L_{(k)е}^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$, $k = \overline{1, K(z)}$). В рамках мультитензорного описания ТКС условием обеспечения каждому информационному трафику заданного качества связи (требуемое время передачи) является выполнение неравенства (15). Так как в общем случае в рамках доступных сетевых ресурсов их резервирование

можно произвести множеством способов, формализацию процедуры резервирования можно осуществить, например, в виде следующей оптимизационной задачи.

Необходимо минимизировать стоимость резервирования сетевых ресурсов, значение которой выражено целевой функцией

$$W = V^t L_e^{(v)}, \quad (16)$$

где V – вектор весовых коэффициентов размерности n , координаты v_i ($i = \overline{1, n}$) которого характеризуют удельную стоимость резервирования единицы пропускной способности i -й ветви сети; $L_e^{(v)}$ – вектор величин зарезервированных пропускных способностей ветвей сети, рассчитываемый как

$$L_e^{(v)} = \sum_{z=1}^Z F^{(z)} \left\{ \left(\sum_{k=1}^{K(z)} L_{(k)е}^{(z)} \right) E_{(z)} \right\}, \quad (17)$$

где $E_{(z)}$ – вектор размерности $n^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$), все координаты которого равны единице.

Решение сформулированной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией целевой функции (16) с ограничениями (7), (10), (15) и (17), обеспечивает минимальную стоимость резервирования необходимых сетевых ресурсов для обслуживания принятых сетью информационных трафиков пользователей с требуемыми показателями качества связи.

В-третьих, в случае, когда решить поставленную оптимизационную задачу в рамках ограничений (10) не представляется возможным, производится отказ в обслуживании сетью наименее приоритетному трафику (или группе трафиков) и осуществляется повторное решение задачи.

В-четвертых, для каждого информационного трафика в рамках зарезервированных для его обслуживания сетевых ресурсов производится решение задачи многопутевой маршрутизации как в обычной однопродуктовой двухполюсной сети [8]. Решение задачи состоит в последовательном вычис-

лении контурных компонентов вектора $H_{(k)к.п.у}^{(z)}$:

$$H_{(k)к}^{(z)} = \left(\langle 2 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} \right) \left[\langle 4 \rangle L_{(k)к.п.у}^{(z)} \right]^{-1} H_{(k)п.у}^{(z)} \quad (18)$$

и вектора загрузки ветвей сети $H_{(k)в}^{(z)}$ (6).

Демонстрация работы метода МПМ в ТКС

Продемонстрируем решение задачи многопутевой маршрутизации в ТКС, обслуживающей одновременно несколько трафиков между множеством узлов, на следующем примере. Пусть структура ТКС (рис.1) задана одномерной сетью (рис.2) и содержит четыре узла (У1-У4) и пять ветвей, определив тем самым $m = 4$, $n = 5$, $r = 2$ и $s = 3$.

Пусть по условиям задачи необходимо обеспечить обслуживание трех информационных трафиков, параметры которых приведены в табл. 1, с использованием не более одного переприема. приоритетность трафика соответствует его номеру.

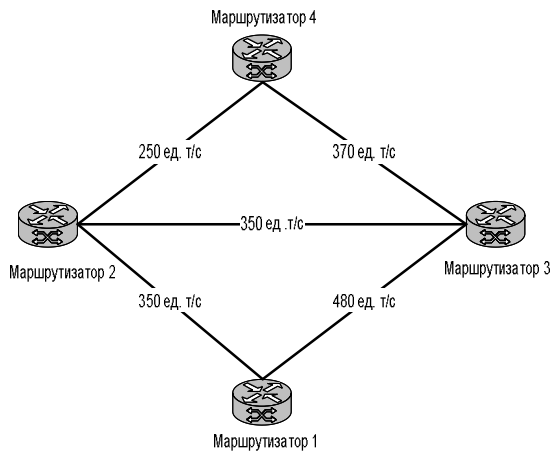


Рис. 1. Структура моделируемой ТКС

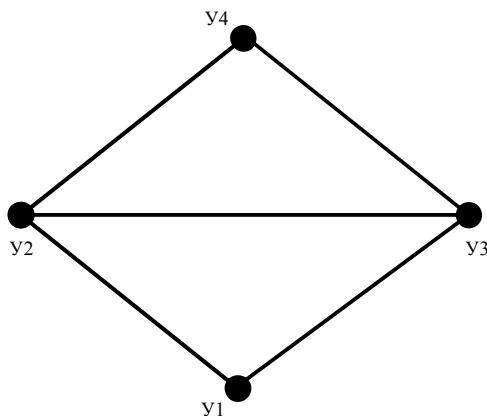


Рис. 2. Одномерная сеть – модель ТКС

Таблица 1

Параметры информационных трафиков

Номер трафика	Первый	Второй	Третий
Направление передачи	У1 → У4	У2 → У3	У3 → У4
Объем трафика (ед. т)	400	300	450
Требуемое время доставки(с)	2	1	3

Ветви исходной сети определяют единую СК. Их нумерация, а также пропускные способности (рис.1), расположенные на главной диагонали матрицы $L_{в}$, приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Пропускные способности ветвей сети

Номер ветви	Ветвь	Величина пропускной способности ветви (ед. т/с)
1	У1 ↔ У2	350
2	У2 ↔ У4	250
3	У1 ↔ У3	480
4	У3 ↔ У4	370
5	У2 ↔ У3	350

В соответствии с условиями задачи первый трафик (Тр1) должен быть передан без использования тракта У2 ↔ У3, а третий – без трактов У1 ↔ У3 и У1 ↔ У2, чему соответствует следующие величины $n^{(z)}$ ($z = \overline{1, Z}$): $n^{(1)} = 4$, $n^{(2)} = 5$ и $n^{(3)} = 3$. Выбор базисных (координатных) путей, заданных последовательностью входящих в них узлов, для координатных систем 1-сети, 2-сети и 3-сети приведен в таблицах 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 3

Выбор базисных путей в 1-сети

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер	
	1	2
Ветвей сети	У1 → У2	У2 → У4
Контуров и пар узлов	У1 → У2	Убывает из У4
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер	
	3	4
Ветвей сети	У1 → У3	У3 → У4
Контуров и пар узлов	Убывает из У2	Убывает из У3

Таблица 4

Выбор базисных путей в 2-сети

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	У2 → У4	У4 → У3	У2 → У3
Контуров и пар узлов	У2 → У4	У2 → У1	Убывает из У3
Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	4	5	
Ветвей сети	У2 → У1	У1 → У3	
Контуров и пар узлов	Убывает из У4	Убывает из У1	

Таблица 5

Выбор базисных путей в 3-сети

Система координат	Направленность базисного пути, имеющего номер		
	1	2	3
Ветвей сети	У3 → У4	У3 → У2	У2 → У4
Контуров и пар узлов	У3 → У4	Убывает из У4	Убывает из У2

Согласно алгебре путей, предложенной в работе [9] и использованной в работах [6; 8], а также в соответствии с определенными выше базами представления сети, матрицы, формализующие законы ковариантного и контравариантного преобразования, имеют вид

$$C_{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad A_{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$C_{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad A_{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$C_{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad A_{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

с выполнением условий ортогональности (8).

Выбор СК в z -сетях определил следующий вид матриц пересчета $F^{(z)}$ ($z = \overline{1,3}$)

$$F^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad F^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad F^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Не останавливаясь подробно на процессе решения оптимизационной задачи по минимизации функции (16) с ограничениями (7), (10), (15) и (17), в качестве ее допустимого решения можно принять величины зарезервированных сетевых ресурсов (ед. т/с), приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Величины резервируемых сетевых ресурсов

трафик / ветвь	У1 ↔ У2	У2 ↔ У4	У1 ↔ У3	У3 ↔ У4	У2 ↔ У3
Тр1	250	150	430	140	0
Тр2	100	10	50	100	240
Тр3	0	25	0	130	110

Оставшаяся часть канальных ресурсов, например ветви $У2 \leftrightarrow У4$, может быть использована для обслуживания других информационных трафиков по возможности (*Best Effort*) [6], т.е. без предоставления каких либо определенных гарантий качества предоставляемых услуг связи, что соответствует в технологии *ATM* [1] следующим типам *QoS*: *ABR* (*Available Bit Rate*) – предоставление пользователю оставшейся невостребованной части физического канала и *UBR* (*Unspecified Bit Rate*), не предусматривающего гарантированного предоставления пользователю какой-либо полосы пропускания.

Подобный порядок резервирования сетевых ресурсов (табл.6) определил согласно координат векторов $H_{(1)g}^{(1)}$, $H_{(1)g}^{(2)}$, $H_{(1)g}^{(3)}$ (табл.7) множество маршрутов передачи трафиков Тр1-Тр3 (табл.8).

Стоит для сравнения отметить, что в случае реализации однопутевой стратегии маршрутизации Тр1 может быть доставлен лишь с использованием маршрута $У1 \rightarrow У3 \rightarrow У4$, Тр2 – лишь по маршруту $У2 \rightarrow У3$, а время доставки, которое может быть

обеспечено сетью низкоприоритетному трафику Тр3, составит 22.5 с. В этом случае Тр3 получит отказ в обслуживании или будет обслужен лишь после передачи первых двух трафиков.

Таблица 7

Координаты векторов информационной загрузки

Вектор	Координаты вектора				
	1	2	3	4	5
$H_{(1)g}^{(1)}$	188,1	188,1	211,9	211,9	-
$H_{(1)g}^{(2)}$	9.12	9.12	290.88	0	0
$H_{(1)g}^{(3)}$	389,04	60,96	60,96	-	-

Таблица 8

Рассчитанные маршруты передачи

Трафик	Маршрут передачи (величина передаваемого трафика)	
	1	2
Тр1	У1 → У2 → У4 (188,1 ед. т)	У1 → У3 → У4 (211,9 ед. т)
Тр2	У2 → У4 → У3 (9.12 ед. т)	У2 → У3 (290.88 ед. т)
Тр3	У3 → У4 (389,04 ед. т)	У3 → У2 → У4 (60,96 ед. т)

Рекомендации по реализации разработанного метода многопутевой маршрутизации в ТКС

Реализация предложенного метода МПМ в современных и перспективных ТКС послужит залогом увеличения их производительности за счет обеспечения сбалансированного использования имеющихся сетевых ресурсов. Отличием разработанного метода МПМ является его ориентация на предоставление услуг связи гарантированного качества.

При реализации метода МПМ стоит использовать режим маршрутизации от «источника». В этом случае в функции приграничного маршрутизатор ТКС будет входить агрегирование трафиков и расчет необходимого множества маршрутов их передачи. Функцией транзитных маршрутизаторов будет лишь обеспечение продвижения частей трафика вдоль ранее рассчитанного маршрута.

Недостатки, характерные для такого режима маршрутизации и связанные с необходимостью передачи избыточных объемов служебной информа-

ции, существенно уменьшаются. Это связано с тем, что информацию о полном маршруте передачи трафика будет содержать не каждый пакет, а лишь первый из каждой части трафика.

Для установления в сети рассчитанных маршрутов необходимо использовать специальный протокол сигнализации, обеспечивающий сбор информации о состоянии ТКС – номинальных и доступных величинах пропускных способностей трактов передачи. За основу подобного протокола целесообразно взять расширенный *RSVP* или *CD-LDP*, используемые в сетях *MPLS TE*.

При реализации предлагаемого метода МПМ может быть использован и принцип коммутации меток, применяемый в *MPLS*-сетях. Разница состоит в том, что приграничный маршрутизатор *LER* разделив исходный пользовательский трафик на ряд его частей, передаваемых по различным маршрутам, для каждого из них устанавливает обычный виртуальный путь или путь коммутации меток *LSP (Label Switching Path)*. Этот путь копируется протоколом распространения меток *LDP* с формированием и рассылкой соответствующих таблиц продвижения меток для каждого рассчитываемого маршрута вдоль внутридоменных *LSR* – маршрутизаторов коммутации меток.

С целью увеличения масштабируемости полученные *hard QoS* решения целесообразно дополнить моделями *soft QoS*, например *DiffServ* и др.

Выводы

В работе предложено решение маршрутных задач в ТКС, представленных многопродуктовыми многополосными сетями, в рамках мультитензорных моделей и методов расчета. Результат решения представлен в виде соответствующего метода маршрутизации, относящегося к классу методов с поддержкой услуг связи гарантированного качества. Приведенный в работе метод и связанные с ним вычислительные процедуры могут быть положены в основу вновь разрабатываемых протоколов маршру-

тизации в современных и перспективных мультисервисных сетях связи, в рамках которых осуществляется одновременное обслуживание множества разнотипных информационных трафиков пользователей между различными парами узлов «отправитель-получатель». Принципы, заложенные в синтезированный метод МПМ, полностью согласуются с требованиями концепции *Traffic Engineering*, связанных с обеспечением сбалансированной загрузки всех имеющихся сетевых ресурсов

Использование мультитензорного подхода к моделированию ТКС позволило получить в аналитическом виде условия для осуществления резервирования необходимых сетевых ресурсов с целью решения задач многопутевой маршрутизации для случая многопродуктовых многополюсных сетей. В зависимости от постановки задачи маршрутизации с поддержкой *QoS* показателем качества обслуживания может выступать требуемое время обслуживания трафика заданного объема, что отвечает принятым на практике в рамках технологий *IP/IntServ*, *MPLS* и *ATM* категориям обеспечения *QoS*. Работу метода МПМ продемонстрировано на численном примере расчета сети. Результаты расчета подтвердили его преимущества по сравнению со стратегиями однопутевой маршрутизации.

Предложенные мультитензорная модель ТКС и метод МПМ обеспечивают адекватную формализацию решения маршрутных задач в сетях с коммутацией сообщений и пакетной коммутацией, когда доведение исходного трафика происходит путем его разбиения на такое количество дейтаграмм, которое соответствует количеству маршрутов доставки между узлами «отправитель-получатель».

При моделировании процессов маршрутизации информационных трафиков в сетях с коммутацией пакетов с заранее известными величинами пакетов полученные выше результаты могут использоваться в качестве приблизительных решений. Для повышения точности расчетов необходимо осуществить

переход к тензорным (мультитензорным) моделям ТКС риманова пространства, что определяет дальнейшее направление исследований по данной проблематике.

Литература

1. Назаров А.Н., Симонов М.В. АТМ: технология высокоскоростных сетей. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997. – 232 с.
2. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.Пб.: ВHV, 2002. – 512 с.
3. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
4. Олифер В., Олифер Н. Искусство оптимизации трафика // Журнал сетевых решений / LAN, №12, 2001. – С.38-47.
5. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J. A Multipath Framework Architecture for Integrated Services. Proc. of GLOBECOM. 2000.
6. Лемешко А.В. Мультитензорное представление многопродуктовой многополюсной модели телекоммуникационной сети // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. - Вып. 21. - С. 77-87.
7. Лемешко А.В. Тензорный подход к моделированию мультисервисных сетей с поддержкой услуг связи гарантированного качества // Радиотехника. 2003. – Вып. 133. – С. 33-41.
8. Лемешко А.В. Особенности моделирования двухполюсной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника. 2002. – Вып. 128. – С. 16–25.
9. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1978. – 719 с.

Поступила в редакцию 22.08.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Поповский В.В., Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков