

МОДЕЛЬ МНОГОПУТЕВОЙ QoS-МАРШРУТИЗАЦИИ В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Введение

В современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) проблема предоставления гарантий качества связи, несмотря на стремительное развитие сетевых технологий, все еще является достаточно острой [1, 2]. Основные трудности, возникающие в процессе обеспечения заданного уровня качества обслуживания (Quality of Service, QoS), обусловлены ростом мультисервисности и разнородности циркулирующих в современных ТКС информационных трафиков. Это, в свою очередь, приводит к необходимости дифференциации пакетов отдельных пользовательских потоков, организации их приоритетной обработки с контролем качества обслуживания одновременно по нескольким скоростным и вероятностно-временным показателям QoS. Для удовлетворения постоянно возрастающих пользовательских запросов к качеству обслуживания производители сетевого оборудования наряду с уже ставшими традиционными средствами обеспечения QoS канального уровня вынуждены широко привлекать возможности сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Прежде всего, задействуется потенциал средств маршрутизации, т.к. именно она способна обеспечить предоставление наиболее востребованных в настоящее время услуг связи с контролем качества обслуживания из конца в конец (end-to-end).

Отличительной особенностью технологических решений в области маршрутизации, нашедших свою реализацию в технологиях пакетной коммутации IP (Internet Protocol), ATM (Asynchrony Transfer Mode) и MPLS (MultiProtocol Label Switching) телекоммуникационных сетей уровня WAN (Wide Area Network), является переход к многопутевым стратегиям, способным обеспечить более высокие показатели производительности в рамках доступных сетевых мощностей [3, 4]. Одновременное использование множества путей доставки пакетов одного и того же трафика действительно способствует повышению скоростных показателей (пиковая и средняя скорость передачи) качества обслуживания. Однако контроль таких важных вероятностно-временных показателей QoS, как средняя задержка, джиттер, вероятность своевременной доставки и др. одновременно вдоль множества путей в рамках существующих моделей решения задач многопутевой маршрутизации, основанных на процедурах балансировки нагрузки [5, 6], существенно затрудняется.

Причина подобной ситуации состоит в том, что наиболее распространенные из существующих протоколов маршрутизации [6, 7] IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), EIGRP (Extended IGRP), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System), OSPF (Open Shortest Path First) и PNNI (Private Network – to – Network Interface), основываясь на сетевых (графовых) моделях с поддержкой комплексных метрик и эвристических процедур балансировки нагрузки на узлах ТКС, в лучшем случае обеспечивают выполнение необходимых, но отнюдь не достаточных условий гарантированного качества обслуживания при расчете искомым путей доставки пакетов. Поэтому нередко проблема обеспечения QoS перекладывается на сигнальные протоколы RSVP (Resource Reservation Protocol) в рамках модели IntServ (Integrated Services) в IP-сетях или RSVP+ и SCR-LDP (Signalling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol) в MPLS-сетях, отвечающих за установление соединений с заданными показателями QoS вдоль ранее рассчитанных путей. В этой связи работа сигнальных протоколов RSVP и SCR-LDP приобретает итерационный характер, т.к. маршрутизирующие протоколы не обеспечивают расчет удовлетворительных маршрутов с первого раза [8].

Базовая потоковая модель QoS-маршрутизации

Выход из создавшегося положения видится в переходе к более информативным математическим моделям маршрутизации и управления сетевыми ресурсами в целом, которые позволили бы адекватно формализовать процессы информационного обмена с учетом потокового характера трафика в ТКС [9, 10, 11]. Наиболее апробированной из множества известных потоковых моделей маршрутизации является модель, предложенная Галлагером [11] и получившая свое развитие в ходе работ [12, 13]. В настоящей работе именно эта модель и будет выбрана в роли базовой с дальнейшим расширением ее функциональных возможностей путем введения ограничений на качество обслуживания по скоростным и временным показателям QoS. В соответствии с постоянно обновляемой маршрутной терминологией [14] предлагаемая модель будет относиться к общему классу моделей маршрутизации, основанной на ограничениях (Constraint-Based Routing), а также к подклассу моделей многопутевой маршрутизации с поддержкой качества обслуживания (Multipath QoS-Based Routing).

В рамках модели Галлагера предполагается, что все каналы связи абсолютно надежны и помехоустойчивы, емкость буферной памяти на узлах является неограниченной, а время обработки в узлах пренебрежимо мало. Предполагается в качестве критерия качества решения задач маршрутизации использовать выражение

$$D_0 = \min_{\lambda} \sum_{(i,j)} D_{ij}(\lambda_{ij}), \quad (1)$$

где каждая функция D_{ij} является монотонно возрастающей.

С позиции теории массового обслуживания каждый тракт передачи (ТП) сети рассматривается, как правило, в виде модели $M/M/1$. При этом поток, поступающий в сеть, считается пуассоновским, длины пакетов предполагаются независимыми и распределенными по показательному закону. Одним из основных моментов является принятие «гипотезы о независимости», предполагающей, что при объединении нескольких потоков в ТП сохраняется независимость между интервалами поступления и длинами пакетов [15]. Тогда в качестве функции D_{ij} обычно выбирается соотношение

$$D_{ij}(\lambda_{ij}) = \frac{\lambda_{ij}}{\varphi_{ij} - \lambda_{ij}} + \tau_{ij}^n \lambda_{ij}, \quad (2)$$

где λ_{ij} – информационный поток (1/с) в тракте передачи (i, j) ; φ_{ij} – пропускная способность тракта (i, j) (1/с); τ_{ij}^n – задержка пакетизации и распространения пакетов (с).

Другой стоимостной критерий по отношению к (2) с аналогичными качественными свойствами может быть представлен выражением вида

$$D_{ij}(\lambda_{ij}) = \max_{(i,j)} \left\{ \frac{\lambda_{ij}}{\varphi_{ij}} \right\}, \quad (3)$$

численно характеризующий максимум коэффициента использования трактов передачи.

Пусть r_{ij} – интенсивность входного потока (1/с), поступающего в сеть через узел i и предназначенного для узла j ; γ_{ij} – сумма входного потока и потока, поступающего на узел i от смежных узлов соседей для узла j ; маршрутная переменная ϕ_{jk}^i – часть потока γ_{ij} , который отправляет узел i по тракту (i, k) . В процессе решения необходимо выполнять условие сохранения потока

$$\gamma_{ij} = r_{ij} + \sum_{k \in M^i} \gamma_{kj} \phi_{ji}^k \text{ при } \sum_{j \in M} \gamma_{ij} \phi_{jk}^i = \lambda_{ik}, \quad (4)$$

где M^i – множество соседних узлов узлу i .

На маршрутные переменные накладываются следующие условия:

$$\phi_{jk}^i = \begin{cases} 0, & \text{если } i = j; \\ \geq 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \text{ и } \sum_{k \in M^i} \phi_{jk}^i = 1. \quad (5)$$

Ввиду ограниченной пропускной способности трактов передачи имеет место следующее ограничение:

$$\phi_{ij} > \lambda_{ij}. \quad (6)$$

Для решения сформулированной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией целевой функции (1) при ограничениях (4), предложены метод Галлагера и метод Франка-Волфа [11, 16]. В рамках решения были сформулированы необходимые и достаточные условия для получения минимальной величины задержки в среднем по сети. Слагаемые $D_{i,j}(\lambda_{i,j})$ (2) являются функциями величины потока, протекающего по тракту передачи (i, j) , и характеристик этого тракта (пропускной способности, задержки на обработку и распространение). При этом ключевую роль в формулировке и решении задачи играют частные производные целевой функции $\frac{\partial D_0}{\partial r_{i,j}}$ и $\frac{\partial D_0}{\partial \phi_{i,j}^k}$.

Однако, как показано в работах [12, 13], метод Галлагера обеспечивает невысокую скорость сходимости получаемых решений и может применяться для маршрутизации стационарного и квазистационарного трафика. В этих работах предложены подходы к улучшению вычислительных процедур метода, основанные на использовании вторых производных. Для устранения зависимости от глобальных констант состояния сети и требований к статичности передаваемого трафика в работе [12] предложен комбинированный подход к получению близких к оптимальным решений сформулированной задачи путем последовательного использования следующих трех процедур:

1. Распределенная процедура расчета кратчайшего множества безпетельных путей (кратчайших мультипутей), основанная на комбинаторных методах многопутевой маршрутизации, например MPDA (Multipath Partial Dissemination Algorithm) или MPATH (Multipath Routing Algorithm) [12, 13].

2. Процедура расчета оптимальных потоков в рамках модели Галлагера, основанная на ранее рассчитанном множестве мультипутей.

3. Процедура расчета задержек в трактах передачи сети для последующей работы первой процедуры, где они выступают в качестве метрических переменных.

Однако использование в рамках модели Галлагера в качестве критерия оптимальности средней по сети временной задержки пакетов (1) и (2), способствуя решению задачи балансировки нагрузки, не позволяет обеспечить управление сетевыми ресурсами, удовлетворяющего индивидуальным требованиям каждого конкретного трафика, что является ключевым моментом при QoS-маршрутизации. Возможность использования выражения для оценки межконцевых значений задержки, джиттера, показателей надежности связи [17, 18] появляется лишь при реализации статических стратегий маршрутизации или маршрутизации на основе заблаговременного предвычисления путей, что существенно сужает область применения подобного рода моделей.

Тензорная интерпретация модели многопутевой маршрутизации в ТКС

Для формализации искомым QoS-ограничений необходимо располагать достаточно общей моделью ТКС, способной математически корректно описать взаимозависимость, с одной стороны, структурных и функциональных параметров сети, а с другой, характеристик трафика и разнотипных показателей качества обслуживания. В рамках системного подхода приветствуется переход от скалярных моделей к их векторно-матричным аналогам, а от них к еще более информативным тензорным формам [19].

В работах [20, 21] получены условия обеспечения качества обслуживания по временным показателям QoS (средняя задержка и джиттер) как в условиях идеальной надежности сетевых элементов, так и при их отказах. Эти условия сформулированы в рамках математических моделей ТКС, приведенных к тензорному виду, и могут использоваться для решения широкого круга задач: от простейших расчетных задач анализа показателей QoS, до более сложных задач маршрутизации, управления трафиком и сетевыми ресурсами в целом. Ниже QoS-ограничения будут адаптированы под условия приведенной выше потоковой модели маршрутизации Галлагера.

В соответствии с методологией тензорного анализа сетей, предложенной Г. Кроном [22], исследуемая система, в данном случае ТКС, на структурном уровне представляется одномерным симплициальным комплексом – одномерной сетью $S = (U, V)$, состоящей из двух множеств: конечного множества $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ нульмерных симплексов – узлов сети, и конечного множества $V = \{v_i, i = \overline{1, n}\}$ одномерных симплексов – ветвей сети. Узлы сети моделируют коммутаторы, маршрутизаторы ТКС, а ветви – тракты передачи. По аналогии с теорией графов цикломатическое число связной сети $\mu(S) = n - m + 1$ определяет количество независимых контуров сети, т.е. $\Pi = \{\pi_i, i = \overline{1, \rho}\}$, а по рангу сети $\rho(S) = m - 1$ можно рассчитать число независимых узловых пар – $H = \{\eta_i, i = \overline{1, \mu}\}$, при $n = \rho(S) + \mu(S)$.

В рамках ортогонального представления тензорной модели ТКС структура сети определяет анизотропное пространство, образованное множеством ветвей или множеством независимых контуров и узловых пар сети, размерность которого численно равна количеству ветвей. Совокупность независимых путей в сети – замкнутых (контуров) и разомкнутых (узловых пар) образует системы координат [22], 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 (СК). Каждый путь ввиду своей независимости определяет в рамках введенного пространства координатную ось, а каждая структура – свою систему координат.

Модель Галлагера (1-5) по своему содержанию описывает ТКС как многопродуктовую многополюсную сеть (ММС), где множество продуктов – трафики в сети, а полюса – пары «отправитель-получатель». В работе [23] математическое описание ММС удалось осуществить мультитензором евклидова пространства, т.к. модель была ориентирована на формализацию процессов передачи одиночных пакетов и не учитывала потоковый характер трафика. Обобщая результаты работ [20, 21], в отличие от тензорного описания, приведенного в статье [23], телекоммуникационную сеть в виде ММС можно представить геометрическим объектом смешанного измерения

$$G = \Lambda^{(1)} \otimes \dots \otimes \Lambda^{(z)} \otimes \dots \otimes \Lambda^{(Z)} \otimes T^{(1)} \otimes \dots \otimes T^{(z)} \otimes \dots \otimes T^{(Z)}, \quad (7)$$

в котором

$$\Lambda^{(z)} = \Lambda_{(1)}^{(z)} \otimes \Lambda_{(2)}^{(z)} \otimes \dots \otimes \Lambda_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes \Lambda_{(K(z))}^{(z)} \quad \text{и} \quad T^{(z)} = T_{(1)}^{(z)} \otimes T_{(2)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(k)}^{(z)} \otimes \dots \otimes T_{(K(z))}^{(z)}$$

– мультитензоры интенсивностей трафиков ($k = \overline{1, K_{(z)}}$) и временных задержек пакетов, передаваемых между z -й парой узлов сети в координатных путях сети; \otimes – символ тензорного умножения; $K_{(z)}$ – общее количество трафиков, образующих информационный поток между z -й парой узлов сети.

Особенностью геометрического объекта (7) является то, что каждый входящий в него тензор представляется в своем $n_{(k)}^{(z)}$ -мерном подпространстве, которое соответствует (z) -сети. В свою очередь, (z) -сеть образуют ветви, задействованные для обслуживания k -го трафика, пакеты которого передаются между z -й парой узлов сети [23]. В каждом из введенных подпространств $\Lambda_{(k)}^{(z)}$ – контравариантный, а $T_{(k)}^{(z)}$ – ковариантный тензоры, координаты которых связаны между собой соотношением

$$T_{(k)}^{(z)} = E_{(k)}^{(z)} \Lambda_{(k)}^{(z)}, \quad (8)$$

где $E_{(k)}^{(z)}$ – дважды ковариантный (метрический) тензор.

В СК ветвей сети тензорное выражение (8) принимает векторно-матричный вид

$$T_{(k)v}^{(z)} = E_{(k)v}^{(z)} \Lambda_{(k)v}^{(z)}, \quad (9)$$

в котором координаты вектора $T_{(k)v}^{(z)}$ определяют средние временные задержки пакетов в каждой из $n_{(k)}^{(z)}$ ветвей сети; координаты вектора $\Lambda_{(k)v}^{(z)}$ характеризуют интенсивность k -го трафика, пакеты которого передаются между z -й парой узлов сети. Метрика подпространств, определяемая координатами метрического тензора $E_{(k)}^{(z)}$, полностью определяется моделью обслуживания пакетов в том или ином тракте (ветви) сети. Без потери общности получаемых результатов в качестве подобных моделей можно принять модель обслуживания $M/M/1$ [15]. В рамках этой модели средняя задержка передаваемых пакетов в i -й ветви сети рассчитываются в соответствии с выражением

$$\tau_i^v = \frac{1}{\varphi_i - \lambda_i^0} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (10)$$

где λ_i^0 – суммарный поток в рассматриваемой ветви.

Систему уравнений (10) удобно представить в следующем виде:

$$\tau_i^v = \frac{1}{\lambda_{(k)v}^{(z)i} (\varphi_i - \lambda_i^0)} \lambda_{(k)v}^{(z)i} \quad \text{при} \quad \lambda_i^0 = \sum_z \sum_k \lambda_{(k)v}^{(z)i} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (11)$$

где $\lambda_{(k)v}^{(z)i}$ – интенсивность k -го трафика (1/с) в i -й ветви сети, пакеты которого передаются между z -й парой узлов.

В уравнении (11) в левой части записана средняя задержка пакетов всех трафиков в i -й ветви сети, т.к. модель Галлагера в явном виде не подразумевает ни приоритетной обработки пакетов различных трафиков, ни возможности резервирования сетевых ресурсов. Тогда в соответствии с выражением (11) координаты метрического тензора в системе координат отдельных ветвей сети, представленные элементами диагональной матрицы $E_{(k)v}^{(z)} = \left\| e_{(k)i,j}^{(z)v} \right\|$, имеют вид

$$e_{(k)i,i}^{(z)v} = \frac{1}{\lambda_{(k)v}^{(z)i} (\varphi_i - \lambda_i^0)}. \quad (12)$$

Зависимость в явном виде компонент метрического тензора от координат контра-вариантного тензора определяет неевклидовость введенных выше пространств.

В рамках предложенного описания ТКС, не останавливаясь на процедурных аспектах вывода [20], получены следующие условия гарантированного качества обслуживания, выступающие в качестве дополнительных ограничений в ходе решения выше сформулированной оптимизационной задачи QoS-маршрутизации:

$$\tau_{(k)mp\bar{o}}^{(z)} \geq \left(\langle 4,1 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} - \left[\langle 4,2 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \right] \left[\langle 4,4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \right]^{-1} \left[\langle 4,3 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \right] \right)^{-1} \lambda_{(k)}^{(z)mp\bar{o}} \quad (13)$$

при $E_{(k)\pi\eta}^{(z)} = A_{(z)}^t E_{(k)v}^{(z)} A_{(z)}$,

$$\left\| \begin{array}{c|c} \langle 1 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} & \langle 2 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \\ \hline \text{---} & \text{---} \\ \langle 3 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} & \langle 4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \end{array} \right\| = E_{(k)\pi\eta}^{(z)}, \quad \left\| \begin{array}{c|c} \langle 4,1 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} & \langle 4,2 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \\ \hline \text{---} & \text{---} \\ \langle 4,3 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} & \langle 4,4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)} \end{array} \right\| = \langle 4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}, \quad (14)$$

где $\lambda_{(k)}^{(z)mp\bar{o}}$ и $\tau_{(k)mp\bar{o}}^{(z)}$ – требуемые значения, соответственно, интенсивности и средней задержки пакетов k -го трафика, передаваемых между z -й парой узлов сети; $A_{(z)}$ – матрица ковариантного преобразования при переходе от СК отдельных ветвей к СК независимых контуров и узловых пар; $[\cdot]^t$ – символ транспонирования.

Матрицы $E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$ и $\langle 4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$ в процессе расчета представляются в компаунд-тензорном (декомпозиционном) виде (14) согласно содержания таблицы.

Таблица

Компонент	$\langle 1 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 2 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 3 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$
Размерность	$\mu_{(k)}^{(z)} \times \mu_{(k)}^{(z)}$	$\mu_{(k)}^{(z)} \times \rho_{(k)}^{(z)}$	$\rho_{(k)}^{(z)} \times \mu_{(k)}^{(z)}$	$\rho_{(k)}^{(z)} \times \rho_{(k)}^{(z)}$
Компонент	$\langle 4,1 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 4,2 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 4,3 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$	$\langle 4,4 \rangle E_{(k)\pi\eta}^{(z)}$
Размерность	1	$1 \times \langle \rho_{(k)}^{(z)} - 1 \rangle$	$\langle \rho_{(k)}^{(z)} - 1 \rangle \times 1$	$\langle \rho_{(k)}^{(z)} - 1 \rangle \times \langle \rho_{(k)}^{(z)} - 1 \rangle$

Выводы

В статье предложено развитие потоковой модели многопутевой маршрутизации Галлагера путем введения дополнительных условий гарантированного качества обслуживания. Эти условия выступали в роли QoS-ограничений для оптимизационной задачи, положенной в основу потоковой модели маршрутизации. В свою очередь, QoS-ограничения удалось сформулировать в аналитическом виде лишь за счет тензорной интерпретации математической модели телекоммуникационной сети. Благодаря заложенным в модели свойствам, она обеспечивает расчет множества безконтурных мультипутей с контролем качества, в частности, по показателю средней задержки пакетов одновременно для нескольких трафиков пользователей, что полностью удовлетворяет требованиям концепции Multipath QoS-Based Routing.

Сформулированные QoS-ограничения жестко не привязаны к рассмотренной модели обслуживания пакетов в произвольном тракте передачи ТКС. В случае использования других моделей обслуживания, описывающих динамику состояния отдельных трактов передачи, общая форма полученных QoS-ограничений остается прежней. Изменяется лишь содержание ряда матриц, определяющих метрику вводимых пространств. Стоит отметить, что в рамках тензорного подхода основным требованием к моделям сетевых элементов является возможность представления уравнений динамики состояния их элементов в аналитическом виде. Полученные результаты могут быть обобщены на случай аддитивных показателей QoS, например джиттера, который, в ряде случаев, рассматривается как среднее квадратическое отклонение средней задержки.

Модель ориентирована на использование в современных мультисервисных сетях пакетной коммутации. Но ограниченность модели Галлагера состоит в том, что она в явном виде не учитывает приоритетность обслуживаемых трафиков, связанной с различными требованиями к качеству обслуживания. Кроме того, обеспечить заданное качество обслуживания невозможно лишь за счет решения маршрутных задач, связанных с расчетом маршрутных переменных. В ходе дальнейшего развития рассмотренной модели необходимо предусмотреть возможность оптимального распределения не только информационных потоков, но и доступных сетевых ресурсов – пропускной способности ТП и буферной емкости узлов ТКС.

Список литературы: 1. *Вегения Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 386 с. 2. *Засецкий А.В., Иванов А.Б., Постников С.Д., Соколов И.В.* Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Обслуживание, качество услуг, бизнес-управление. М.: Syrus Systems, 2003. 440 с. 3. *Lee G. M.* A survey of multipath routing for traffic engineering // Proc. of LNCS 3391. Springer-Verlag, 2005. Vol. 4. P. 635-661. 4. *Tahilramani K. H., Weiss A., Kanwar S., Kalya-Naraman S., Gandhi. A.* BANANAS: An evolutionary framework for explicit and multipath routing in the internet // Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Future Directions in Network Architecture. Karlsruhe. 2003. P. 277-288. 5. *Руденко И.* Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей. М.: КУДИС-ОБРАЗ, 2003. 656 с. 6. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. СПб.: BHV-С.Пб., 2002. 512 с. 7. *Денисова Т.Б., Лихтциндер Б.Я., Назаров А.Н., Симонов М.В., Фомичев С.М.* Мультисервисные ATM сети. М.: Эко Трендз, 2005. 320 с. 8. *Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С.* Технология и протоколы MPLS. М.: Эко-Трендз, 2005. 304 с. 9. *Siachalou S., Georgiadis L.* Efficient QoS routing // Proc. IEEE INFOCOM 2003. San Francisco, 2003. Vol. 2(3). P. 372-381. 10. *Wang Y., Wang Z.* Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. P. 582-588. 11. *Gallager R. G.* A minimum delay routing algorithm using distributed computation // IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25, №1. P.73-85. 12. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J.* A Simple Approximation to Minimum Delay Routing // Proc. ACM SIGCOMM. Cambridge, 1999. P.39-50. 13. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J.* A traffic engineering approach based on minimum-delay routing // Proc. of IEEE IC3N. Las Vegas, 2000. P. 42-47. 14. *Younis O. Fahmy S.* Constraint-based routing in the internet: basic principles and recent research // IEEE Communication Society Surveys & Tutorials. 2003. Vol.5, №3. P. 42-56. 15. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с. 16. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных. М.:Мир,1989. 544 с. 17. *Евсеева О.Ю., Лемешко А.В., Кравчук А.А.* Поточковая модель процессов маршрутизации с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2004. Вып. 138. С. 32-37. 18. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Беленков А.Г.* Обеспечение гарантированного качества связи при решении задач сетевого уровня ЭМВОС // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2003. Вып. 6 (6). С. 30-33. 19. *Мавродиев А.М.* Системология. Методы и приложения к исследованию военных систем связи. СПб.: Военная академия связи, 1992. 120 с. 20. *Лемешко А.В.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. 2004. Вип. №4 (40). С. 12-18. 21. *Лемешко А.В.* Вероятностно-временная модель QoS маршрутизации с предвычислением путей в условиях неидеальной надежности элементов телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2005. Вып. 142. С. 11-20. 22. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1978. 719 с. 23. *Лемешко А.В.* Мультитензорная интерпретация решения маршрутных задач в телекоммуникационных сетях, представленных мнопродуктовыми многополюсными моделями евклидова пространства // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2003. Вып. 3. С. 115-126.