

ТЕНЗОРНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ*

Д. Ю. Пономарев

Красноярский государственный технический университет

Рассматривается возможность исследования современных телекоммуникационных сетей, предоставляющих одновременно несколько услуг. Исследование проводится контурным методом с использованием тензорного анализа, что позволяет обеспечить более качественное обслуживание потребностей современного информационного общества.

Развитие телекоммуникационных систем, связанное с увеличением объемов передаваемой информации, повышением требований к качеству и усложнением алгоритмов обработки информационных потоков, приводит к достаточно трудоемкому процессу модернизации существующих и проектированию новых сетей связи. Так как задача построения сети решается обычно при малых масштабах, без учета влияния других узлов обслуживания, контроль за качеством затруднен. Решение данной задачи в глобальных сетях классическими методами практически невозможно из-за неоднородности исходных данных для каждой отдельной сети регионального или локального уровней. В связи с этим актуальной становится задача разработки математического аппарата, который позволит при использовании разнородных составляющих определить необходимые характеристики сети с учетом ее большого масштаба.

В данной работе предлагается использовать тензорную методологию для определения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) телекоммуникационных сетей, причем независимо от масштаба, видов обслуживания в узлах и разнородности информационных потоков существующих сетей. Кроме того, при расширении услуг сети либо увеличении числа источников нет надобности заново определять ее необходимые параметры, а достаточно установить исходные данные для новых узлов и вве-

сти их в уже полученные параметры для «старой» сети, что естественно позволит обеспечить более гибкое и быстрое расширение как в области масштаба, так и в области технологий.

В соответствии с «Концептуальными положениями по построению мультисервисных сетей на ВСС РФ» основой для построения широкополосных сетей интегрального обслуживания (ШЦСИО) в Российской Федерации выбраны технологии ATM и IP. Однако, в связи с особенностями развития сетей связи в нашей стране и развития телекоммуникационных технологий в мире, в настоящее время на единой сети электросвязи РФ (ЕСЭ) используется достаточно широкий спектр технологий, которым присущи как преимущества, так и недостатки. Например, в настоящее время для построения мультисервисных сетей часто используется технология MPLS (MultiProtocol Label Switching – коммутация по меткам с многопротокольной поддержкой).

Главным недостатком современных сетей связи считается наличие специализированных сетей для каждого вида услуг. Как правило, ресурсы одной сети не могут быть использованы другой, поэтому возникает необходимость в производстве и техническом обслуживании всех «новых» сетей. В то же время ими необходимо управлять и расширять спектр предоставляемых услуг, обеспечивая увеличение функциональности и преемственность технологий.

* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МК-1232.2005.9.

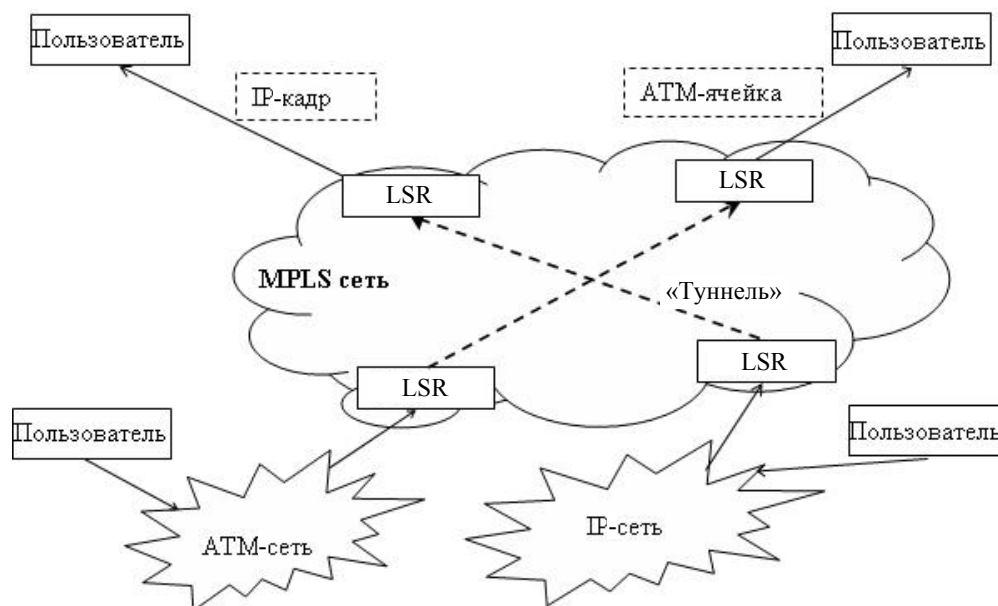


Рис. 1. Вариант построения сети NGN

Общие подходы к построению мультисервисных сетей связи, обеспечивающих конвергенцию и интеграцию различных технологий, отражены в концепции сетей связи следующего поколения – NGN (Next Generation Networks). Данная концепция обеспечивает предоставление неограниченного набора услуг, гибкую возможность управления, вынесение функций предоставления услуг в оконечные сетевые узлы и взаимодействие с традиционными сетями связи. Действительно, идея NGN включает в себя все то лучшее, что хотели бы видеть потребители услуг в сетях связи. Создаются сети, информационные потоки в которых формируются различными службами, что приводит к появлению мультисервисной сети. Однако для того, чтобы обеспечить должное качество обслуживания, необходимо определить характеристики систем обработки, являющиеся решающими при обслуживании информационных потоков. Возможной реализацией идеи NGN может служить сеть, представленная на рис. 1, где основной технологией, используемой для построения ядра сети, является стандарт MPLS.

Любую исследуемую мультисервисную сеть с достаточной степенью достоверности можно представить как сеть массового обслуживания (СМО), вероятностно-временные характеристики которой можно оценить, используя тензорный метод анализа сетей. Основоположителем тензорной методологии анализа систем является известный американский ученый и инженер Г. Крон, который впервые использовал тензорный анализ и топологию в приложении к теории электрических сетей [1]. Дальнейшее развитие идеи тензорного анализа для информационных систем получили в работах А. Е. Петрова [2], А. Е. Арменского, О. Л. Кузнецова, В. П. Кулагина, М. Н. Петрова [3] и др.

Для инженерного анализа ВВХ сетей массового обслуживания предлагается использовать в качестве инвариантного уравнения известное выражение для определения коэффициента использования устройств (загрузка), дающее связь между интенсивностью поступления вызовов (λ) и средним временем обслуживания ($t_{\text{обсл}}$): $\rho = \lambda t_{\text{обсл}}$. Применив тензорный метод для сложной сети массового обслуживания и использовав по-

нения исходной и примитивной сети, можно получить выражения для определения загрузки $\rho = \lambda t_{\text{обсл}}$ в исходной сети, задав параметры для примитивной. Определение нагрузки с помощью уравнения загрузки $\rho = \lambda t_{\text{обсл}}$ является основным отличием от расчетов, использующих инвариантное уравнение средней очереди в системах массового обслуживания [3, 4].

При контурном методе для СМО, состоящей из некоторого числа одноканальных систем с бесконечным буфером (данные параметры не являются ограничением метода), необходимо определить примитивную сеть, состоящую из такого же количества систем и описываемую инвариантным уравнением $\bar{\rho}' = \bar{\lambda}' t'_{\text{обсл}}$, найти матрицу перехода \bar{C} от одной проекции к другой: $\bar{\lambda}' = \bar{C} \bar{\lambda}$, определить составляющие матричного уравнения [5–7]:

$$\bar{C}^T \bar{\rho}' = (\bar{C}^T t'_{\text{обсл}} \bar{C}) \bar{\lambda}. \quad (1)$$

Решая полученное уравнение относительно λ , находим коэффициенты использования устройств в исходной сети. Данный подход позволяет при минимальных затратах оценить загрузку сетей, обеспечив тем самым определение остальных характеристик СМО: распределение вероятностей состояний по

отдельным системам: $p_n = f(\rho)$, а также средней очереди \bar{N} и среднего времени задержки \bar{T} .

В качестве примера рассмотрим сеть, представленную на рис. 1. Исследуемая сеть представляет собой модель предварительной обработки пакетов в сети MPLS (рис. 2): через СМО1 и СМО4 поступают заявки от пользователей и происходит назначение меток, а в СМО2 и СМО3 – дальнейшая обработка пакетов в сети MPLS.

Для проведения анализа перейдем от исходной сети к примитивной: при этом введем мнимые ветви для образования замкнутых контуров с соответствующими контурными интенсивностями (рис. 3).

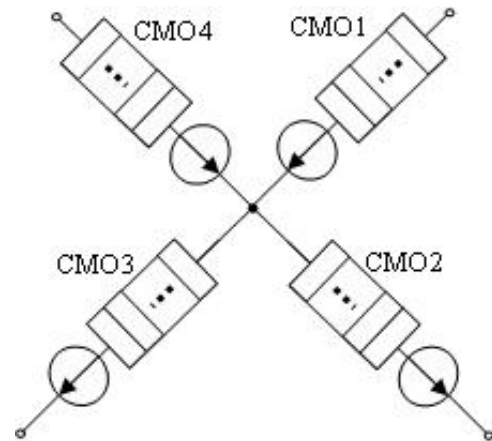


Рис. 2. Сеть массового обслуживания

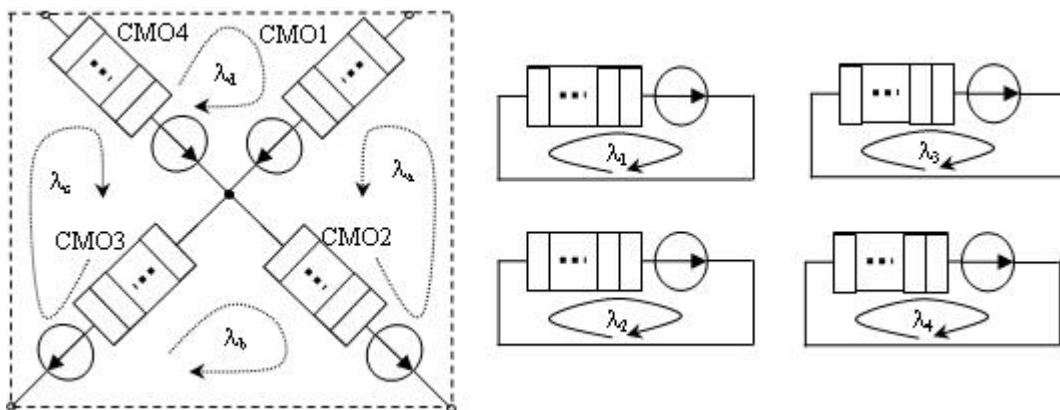


Рис. 3. Исходная и примитивная сети массового обслуживания

Для определения матрицы перехода составим таблицу соответствия контурных интенсивностей исходной и примитивной сетей (табл. 1).

Таблица 1

Интенсивность	λ_a	λ_b	λ_c	λ_d
λ_1	1	0	0	1
λ_2	1	1	0	0
λ_3	0	-1	1	0
λ_4	0	0	1	-1

Следовательно, матрица перехода примет вид

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Зададим среднюю длительность обслуживания:

$$\bar{t} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix}$$

и загрузку узлов для примитивной сети:

$$\begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \rho'_3 \\ \rho'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda'_1 \\ \lambda'_2 \\ \lambda'_3 \\ \lambda'_4 \end{pmatrix}.$$

Для исходной сети инвариантное уравнение будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} \rho_a \\ \rho_b \\ \rho_c \\ \rho_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \end{pmatrix}.$$

Следовательно, перейдя от одной сети к другой, для загрузки исходной сети получим следующее выражение для левой части уравнения (1):

$$\begin{pmatrix} \rho_a \\ \rho_b \\ \rho_c \\ \rho_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \rho'_3 \\ \rho'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho'_1 + \rho'_2 \\ \rho'_2 - \rho'_3 \\ \rho'_3 + \rho'_4 \\ \rho'_1 - \rho'_4 \end{pmatrix},$$

а для времени обслуживания $\bar{t} = \bar{C}^T \bar{t}'_{\text{обсл}} \bar{C}$ имеем

$$\bar{t} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} t_m & t_2 & 0 & t_1 \\ t_2 & t_n & -t_3 & 0 \\ 0 & -t_3 & t_3 + t_4 & -t_4 \\ t_1 & 0 & -t_4 & t_1 + t_4 \end{pmatrix},$$

$$\text{где } \bar{t} = \begin{pmatrix} t_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_d \end{pmatrix}; \quad t_m = t_1 + t_2;$$

$$t_n = t_2 + t_3.$$

Окончательно, запишем:

$$\begin{pmatrix} \rho'_1 + \rho'_2 \\ \rho'_2 - \rho'_3 \\ \rho'_3 + \rho'_4 \\ \rho'_1 - \rho'_4 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} t_1+t_2 & t_2 & 0 & t_1 \\ t_2 & t_2+t_3 & -t_3 & 0 \\ 0 & -t_3 & t_3+t_4 & -t_4 \\ t_1 & 0 & -t_4 & t_1+t_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \end{pmatrix}.$$

Решив полученное уравнение относительно контурных интенсивностей вызовов $\bar{\lambda}^T = (\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c \ \lambda_d)$, определим интенсивности поступления вызовов в системы исходной сети:

$$(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3 \ \lambda_4) = \bar{\lambda}^T \bar{C}^T =$$

$$= \bar{\lambda}^T \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты использования каждого устройства исходной сети $(\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4) = \bar{\lambda}^T \bar{C}^T \bar{t}$ найдем через следующее выражение:

$$(\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4) = \bar{\lambda}^T \bar{C}^T \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix}.$$

В качестве примера рассмотрим сеть с распределением времени обслуживания следующего вида:

$$\begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 \end{pmatrix},$$

а загрузки распределим как

$$\begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \rho'_3 \\ \rho'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\mu_1 \\ 1/\mu_2 \\ 1/\mu_3 \\ 1/\mu_4 \end{pmatrix}.$$

Источниками нагрузки являются пуассоновские потоки, поступающие через СМО1 и СМО2.

Результатом расчетов являются интенсивности информационных потоков по всем системам:

$$\bar{\lambda} = (0,722 \ 0,345 \ 0,873 \ 0,496)$$

и значения загрузки во всех узлах:

$$\bar{\rho} = (0,2888 \ 0,0862 \ 0,6112 \ 0,1488).$$

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено имитационное моделирование в среде GPSS. Результаты моделирования и теоретических выводов практически совпадают, что подтверждается анализируемыми значениями, представленными в табл. 2.

Таблица 2

Загрузка	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4
Расчет	0,2888	0,0862	0,6112	0,1488
Имитационное моделирование	0,289	0,086	0,611	0,149

Более сложный анализ СМО как модели мультисервисных сетей связан с разнородностью потоков в данных сетях. В соответствии с проведенными наблюдениями [8–11], а также учетом опыта моделирования информационных потоков различного вида [8, 10–12] был сделан вывод о возможности использования в качестве источников нагрузки генераторов со следующими распределениями: экспоненциальное в виде классического представления потоков вызовов; распределение Парето, обладающее свойством самоподобия [9, 10] и распределение Вейбулла, имеющее так называемый «тяжелый хвост» и наблюдаемое в реальных телекоммуникационных сетях [9–12].

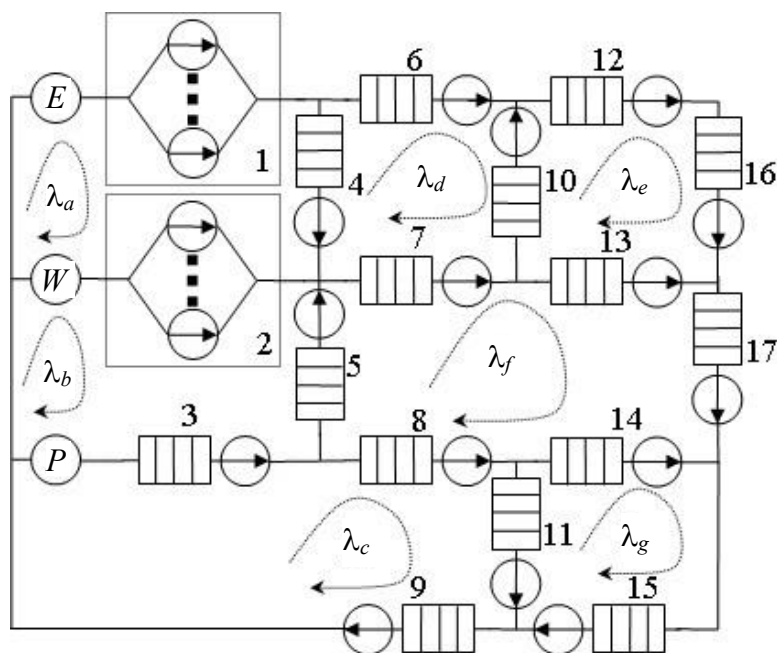


Рис. 4. Исследуемая сеть с разнородными потоками

Исследуемая сеть состоит из трех источников нагрузки: E – экспоненциальное распределение, P – распределение Парето и W – распределение Вейбулла, и 17 систем массового обслуживания: первая и вторая – многоканальные системы с явными потерями (различным числом каналов), остальные – одноканальные системы с бесконечным буфером. Во всех системах, кроме второй и седьмой, распределение длительности обслуживания – показательное, во второй и седьмой – детерминированное (рис. 4).

Для исследуемой сети необходимо составить таблицу соответствия контурных интенсивностей исходной и примитивной сетей, что и даст матрицу перехода C .

Используя выражение (1), в котором

$$\bar{\rho}' = \begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \dots \\ \rho'_{17} \end{pmatrix}, \quad \bar{t}'_{\text{обсл}} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & t_{17} \end{pmatrix},$$

$$\bar{\lambda}' = (\lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c \quad \lambda_d \quad \lambda_e \quad \lambda_f \quad \lambda_g),$$

причем элементы матриц $\bar{\rho}'$ и $\bar{t}'_{\text{обсл}}$ имеют численные значения (табл. 3), состав-

ляем матричное уравнение, решение которого даст вектор контурных интенсивностей $\bar{\lambda}'$. По данному вектору можно найти значения загрузки систем, составляющих сеть (табл. 4).

С целью подтверждения полученных результатов было проведено имитационное моделирование исследуемой сети в среде GPSS World. Математическое ожидание для распределений генераторов находили с учетом расчетных данных и выбранного порядка распределения: распределение Вейбулла с порядком $k = 0,5$ и распределение Парето с параметром $\alpha = 1,6$. Результаты имитационного моделирования практически совпадают с расчетными значениями.

Итак, в результате проведенных исследований получено следующее:

- контурный метод, рассмотренный в данной работе, позволяет решить задачу оценки параметров сложных сетей, используя тензорную методологию преобразований между исходными и примитивными сетями;

- исследование характеристик мультисервисных сетей можно проводить как методами математического, так и имитационного моделирования;

Таблица 3

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}
0,6	0,5	0,9	0,5	0,7	0,8	0,6	0,5	0,4	0,9	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5	0,7	0,6

Таблица 4

ρ_1	ρ_2	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{14}	ρ_{15}	ρ_{16}	ρ_{17}
0,46	0,101	0,228	0,6274	0,3454	0,8085	0,0727	0,7259	0,6349	0,7984

• тензорный подход позволяет оценивать загрузку систем аналитически, причем сложность метода растет линейно в зависимости от масштаба сети в отличие от классических методов, где необходимо для каждой сети создавать

новое решение, сложность которого будет возрастать по степенным законам;

• имитационное моделирование подтверждает возможность использования тензорного подхода к анализу характеристик мультисервисных сетей.

Список литературы

1. Крон, Г. Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – М.: Сов. радио, 1978. – 720 с.
2. Петров, А. Е. Тензорная методология в теории систем / А. Е. Петров. – М: Радио и связь, 1985. – 152 с.
3. Петров, М. Н. Вероятностно-временные характеристики в сетях и системах передачи интегральной информации / М. Н. Петров. – Красноярск, 1997. – 220 с.
4. Красницкий, И. Г. Программно-вычислительный комплекс для анализа вероятностно-временных характеристик сетей интегрального обслуживания / И. Г. Красницкий, Д. Ю. Пономарев. – М.: ВНИИЦ, 2006. – № 50200600037.
5. Ponomarev, D. U. Tensors analysis for investigation next generation network / D. U. Ponomarev // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2005) – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2005. – P. 53–57.
6. Пономарев, Д. Ю. Тензорный метод исследования сетей связи / Д. Ю. Пономарев // Современные проблемы информатизации в информационных системах и телекоммуникациях: сб. тр.; ред. О. Я. Кравец. – Воронеж: Научная книга, 2006. – Вып. 11. – С. 443–447.
7. Пономарев, Д. Ю. О подходе к анализу сетей массового обслуживания с использованием тензорной методологии / Д. Ю. Пономарев // Идентификация систем и задачи управления SICPRO '06: тр. междунар. конф. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2006. – С. 697–704.
8. Feldmann, A. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models / A. Feldmann, W. Whitt // Performance Evaluation. – 1997. – Т. 31. – P. 245–279.
9. Feldmann, A. Characteristics of TCP connection arrivals / A. Feldmann // Technical report, AT&T Labs Research, 1998. – P. 20.

10. Lakhina, A. Diagnosing Network-Wide Traffic Anomalies / A. Lakhina, M. Crovella, C. Diot // Proc. of the Conference On Applications, Technologies, Architectures & Protocols for Computer Communications. – 2004. – P. 219–230.

11. Garrett, M. W. Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic / M. W. Garrett, W. Willinger // Proceedings of ACM SIGCOMM'94. – 1994. – P. 269–280.

12. Пономарев, Д. Ю. Моделирование непуассоновских потоков вызовов / Д. Ю. Пономарев // Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий: материалы междунар. конф. и российской науч. шк. – М.: Радио и связь, 2004. – Ч. 2. – С. 185–186.