

Тензорная методология в телекоммуникациях\*

Пономарев Д.Ю.

В данной работе рассматривается возможность исследования современных телекоммуникационных сетей, предоставляющих одновременно несколько услуг, с использованием контурного метода тензорного анализа, что позволит обеспечить более качественное обслуживание потребностей современного информационного общества.

Tensor methodology in telecommunication

Ponomarev D.U.

There is present contour method of tensor analysis for modern telecommunication networks investigation. This method let providing more good quality of service information streams in multiservice networks.

*\* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1232.2005.9*

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. В связи с тем, что задача построения сети решается обычно при малых масштабах без учета влияния других узлов обслуживания возникает ситуация отсутствия контроля за качеством обслуживания. Решение же данной задачи в глобальных сетях классическими методами практически невозможно в связи с неоднородностью исходных данных для каждой отдельной сети регионального или локального уровня. В связи с этим актуальной становится задача разработки математического аппарата который позволит при использовании разнородных составляющих определить необходимые характеристики сети, учитывая ее большой масштаб.

В данной работе предлагается использовать тензорную методологию для определения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) телекоммуникационных сетей причем независимо от масштаба сети, видов обслуживания в узлах и разнородности информационных потоков, существующих сети. Кроме того, при расширении услуг сети, либо увеличении числа источников нет необходимости заново определять необходимые параметры сети, достаточно определить исходные данные для новых узлов сети и ввести их в уже полученные параметры для старой сети, что естественно позволит обеспечить более гибкое и быстрое расширение сети 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 развитие телекоммуникационных технологий в мире, в настоящее время на единой сети электросвязи РФ (ЕСЭ) используется достаточно широкий спектр технологий, каждой из которых присущи как достоинства, так и недостатки. Например, в настоящее время для построения мультисервисных сетей часто используется технология MPLS (MultiProtocol Label Switching – коммутация по меткам с многопротокольной поддержкой).

К основному недостатку современных сетей связи можно отнести наличие специализированных сетей для каждого вида услуг связи. Как правило, ресурсы одной сети не могут быть использованы другой, поэтому существует 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.

Общие подходы к построению мультисервисных сетей связи, обеспечивающих конвергенцию и интеграцию различных технологий, нашли отражение 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 быть 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 (СеМО), вероятностно-временные характеристики которых 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 Петрова А.Е. [2], Арменского А.Е., Кузнецова О.Л., Кулагина В.П., Петрова М.Н. [3] и др.

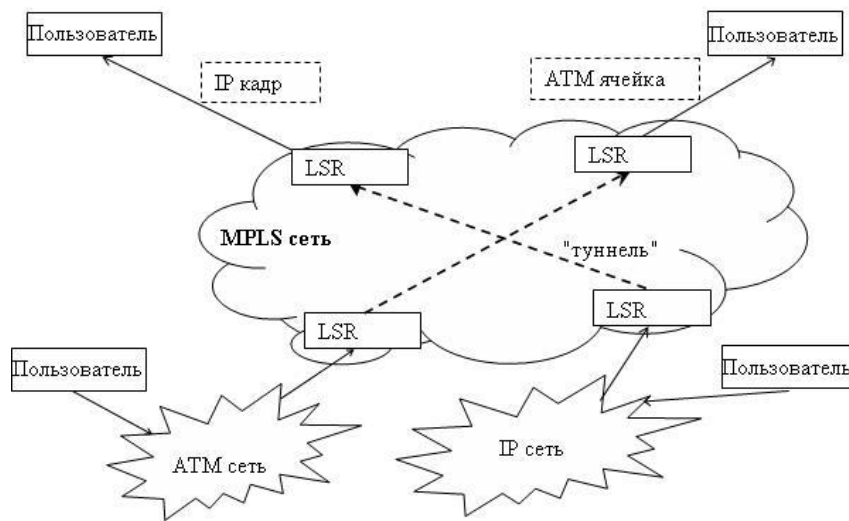


Рисунок 1 – Вариант построения сети NGN

Для инженерного анализа ВВХ сетей массового обслуживания в данной работе предлагается использовать в качестве инвариантного уравнения известное выражение для определения коэффициента использования устройств (загрузка), дающее связь между интенсивностью поступления вызовов ( $\lambda$ ) и средним временем обслуживания ( $t_{обсл}$ ):  $\rho = \lambda t_{обсл}$ . Применив тензорный метод для сложной сети массового обслуживания, используя понятия исходной и примитивной сети, можно получить выражения для определения загрузки в исходной сети, задавая параметры для примитивной сети. Использование данного уравнения является основным отличием от работ, использующих инвариантное уравнение средней очереди в системах массового обслуживания [3,4].

При использовании контурного метода для СеМО, 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 описываемых инвариантным уравнением  $\bar{\rho}' = \bar{\lambda}' \bar{t}'_{обсл}$ , найти матрицу перехода ( $\bar{C}$ ) от одной проекции к другой:  $\bar{\lambda}' = \bar{C} \bar{\lambda}$ , определить составляющие матричного уравнения [5-7]:

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

Решая полученное уравнение относительно  $\lambda$ , находим коэффициенты использования устройств в исходной сети. Данный подход позволяет при минимальных затратах оценить загрузку сетей, обеспечив

тем самым определение остальных характеристик СеМО: 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 происходит дальнейшая обработка пакетов в сети MPLS.

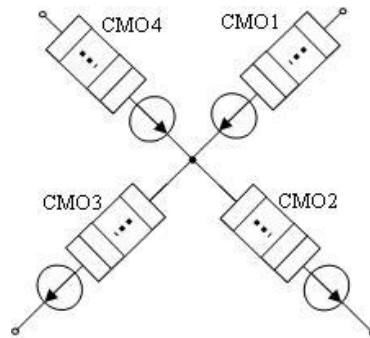


Рисунок 2 – Сеть массового обслуживания

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

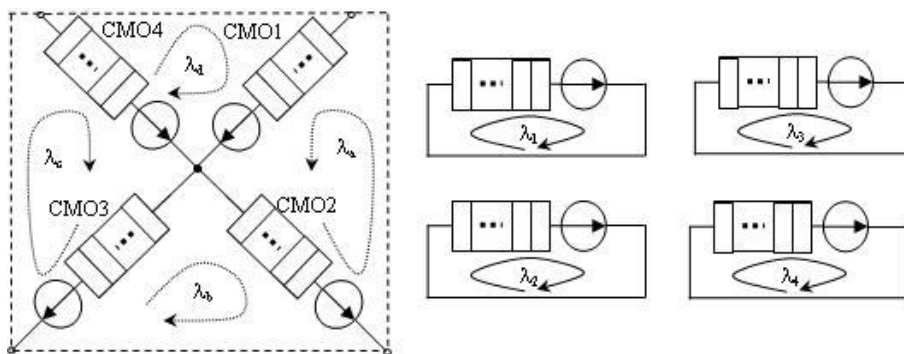


Рисунок 3 – Исходная и примитивная сети массового обслуживания.

Для определения матрицы перехода составим следующую таблицу соответствия контурных интенсивностей исходной и примитивной сетей:

	$\lambda_a$	$\lambda_b$	$\lambda_c$	$\lambda_d$
$\lambda_1$	1	0	0	1
$\lambda_2$	1	1	0	0
$\lambda_3$	0	-1	1	0
$\lambda_4$	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  $\begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \rho'_3 \\ \rho'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda'_1 \\ \lambda'_2 \\ \lambda'_3 \\ \lambda'_4 \end{pmatrix}$  для примитивной сети. 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, переходя от одной сети к другой, для загрузки исходной сети получим следующее выражение  $\bar{\rho} = \bar{C}^T \bar{\rho}'$ :

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

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

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

$$\times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_m & t_2 & 0 & t_1 \\ t_2 & t_n & -t_3 & 0 \\ 0 & -t_3 & t_3 + t_4 & -t_4 \\ t_1 & 0 & -t_4 & t_1 + t_4 \end{pmatrix},$$

$$\text{где: } \bar{t} = \begin{pmatrix} t_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_d \end{pmatrix}; t_m = t_1 + t_2; t_n = t_2 + t_3.$$

Окончательно, можно записать:

$$\begin{pmatrix} \rho'_1 + \rho'_2 \\ \rho'_2 - \rho'_3 \\ \rho'_3 + \rho'_4 \\ \rho'_1 - \rho'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 + t_2 & t_2 & 0 & t_1 \\ t_2 & t_2 + t_3 & -t_3 & 0 \\ 0 & -t_3 & t_3 + t_4 & -t_4 \\ t_1 & 0 & -t_4 & t_1 + t_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \end{pmatrix}.$$

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

$$(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3 \ \lambda_4) = \bar{\lambda}^T \bar{C}^T = \bar{\lambda}^T \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \text{а коэффициенты}$$

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

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

В качестве примера рассмотрим сеть с распределением времени

$$\text{обслуживания следующего вида: } \begin{pmatrix} t_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{pmatrix}, \text{ а}$$

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:

$$\bar{\lambda} = (0.722 \quad 0.345 \quad 0.873 \quad 0.496),$$

и значения загрузки во всех узлах:

$$\bar{\rho} = (0.2888 \quad 0.0862 \quad 0.6112 \quad 0.1488).$$

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено имитационное моделирование в среде GPSS. Результаты моделирования и теоретических выражений практически совпадают, что подтверждается анализируемыми значениями, представленными в таблице 1.

Таблица 1.

	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$
Расчет	0,2888	0,0862	0,6112	0,1488
Имитационное моделирование	0,289	0,086	0,611	0,149

Более сложный анализ СеМО, как модели мультисервисных сетей связан с разнородностью потоков в данных сетях. В соответствии с проведенными наблюдениями [8-11], а также с учетом опыта моделирования информационных потоков различного вида [8,10-12], был сделан вывод об использовании в качестве источников нагрузки, генераторов со следующими распределениями: экспоненциальное, как классическое представление потоков вызовов; распределение Парето, как обладающее свойством самоподобия [9,10] и распределение Вейбулла, как имеющее т.н. «тяжелый хвост» и наблюдаемое в реальных телекоммуникационных сетях [9-12].

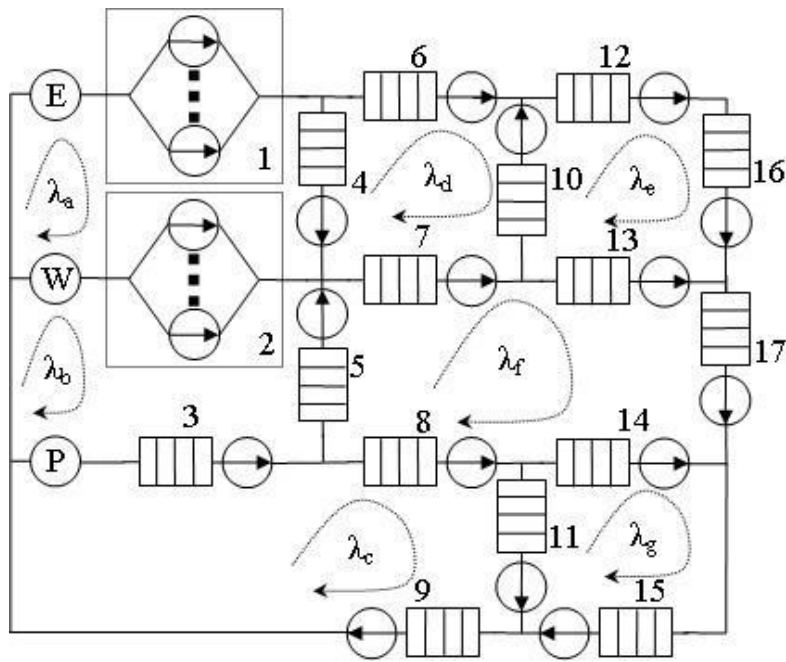


Рисунок 4 – Исследуемая сеть с разнородными потоками.

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 (с 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.

Таблица 2.

$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$	$t_{16}$	$t_{17}$
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

Используя выражение (1), в котором  $\bar{\rho}' = \begin{pmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \bullet \\ \rho'_{17} \end{pmatrix}$ ;

$$\bar{t}'_{обсл} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & t_2 & \bullet & \bullet & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & 0 & \bullet & \bullet & t_{17} \end{pmatrix}; \quad \bar{\lambda}^T = (\lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c \ \lambda_d \ \lambda_e \ \lambda_f \ \lambda_g), \quad \text{причем}$$

элементы матриц  $\bar{\rho}'$  и  $\bar{t}'_{обсл}$  имеют численные значения (значения времени



обслуживания представлены в таблице 2), составляем матричное уравнение, решение которого даст вектор контурных интенсивностей  $\bar{\lambda}^T$ . По данному вектору можно найти загрузки систем составляющих сеть, некоторые из которых представлены в табл. 3.

Таблица 3.

$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_6$	$\rho_7$	$\rho_8$	$\rho_9$	$\rho_{14}$	$\rho_{15}$	$\rho_{16}$	$\rho_{17}$
0.46	0.101	0.228	0.6274	0.3454	0.8085	0.0727	0.7259	0.6349	0.7984

С целью подтверждения полученных результатов было проведено имитационное моделирование исследуемой сети в среде GPSS World. Математическое ожидание для распределений генераторов определялось исходя из 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.

В качестве заключения можно отметить, что:

- 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 необходимо проводить как методами математического, так и имитационного моделирования;
- 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, и 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. –М.: Сов. радио, 1978. – 720 с.
2. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем. – М: Радио и связь, 1985. – 152 с.
3. Петров М.Н. Вероятностно-временные характеристики в сетях и системах передачи интегральной информации. – Красноярск: КГТУ, 1997. – 220 с.
4. Красницкий И.Г., Пономарев Д.Ю. Программно-вычислительный комплекс для анализа вероятностно-временных характеристик сетей интегрального обслуживания. – М: ВНИИЦ, 2006. – №50200600037.
5. Ponomarev D.U. Tensors analysis for investigation next generation network // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Systems Management and Information Technologies. – 2006. – 1.1(23). – С. 161-165.

Communications (SIBCON-2005) – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. – 2005. – P. 53-57.

6. Пономарев Д.Ю. Тензорный метод исследования сетей связи // Современные проблемы информатизации в информационных системах и телекоммуникациях / Сборник трудов. Под ред. д.т.н., проф. О.Я.Кравца. – Вып. 11 – Воронеж: Научная книга. – 2006. – С. 443-447.

7. Пономарев Д.Ю. О подходе к анализу сетей массового обслуживания с использованием тензорной методологии // Труды V Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '06. – М: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – 2006. – С. 697-704.

8. Feldmann A., Whitt W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models // Performance Evaluation. – 1997. – 31. – P. 245-279.

9. Feldmann A. Characteristics of TCP connection arrivals. // Technical report, AT&T Labs Research. – 1998. – P. 20.

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

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

12. Пономарев Д.Ю. Моделирование непуассоновских потоков вызовов // Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. – Часть 2. – М: Радио и связь – 2004. – С. 185-186.