

УДК 004.7

DOI 10.34822/1999-7604-2020-3-25-33

ТЕНЗОРНАЯ МОДЕЛЬ УЧЕТА ПОТЕРЬ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Е. Е. Бизянов [✉], И. В. Рыбалка

Донбасский государственный технический университет

[✉]*E-mail: bpeeecs@gmail.com*

Представлены тензорная модель учета потерь при передаче пакетов данных в компьютерной сети предприятия и обоснование целесообразности ее использования при анализе на основе тензорной методологии. Предложены формулы расчета потерь пакетов данных в узлах компьютерной сети для предприятия и его подразделений, а также для заданного пути в компьютерной сети. Приведен пример тензорной модели расчета потерь пакетов данных для текущего состояния компьютерной сети и в случае ее расширения. Показано, что изменение компьютерной сети предприятия требует модернизации только одной матрицы в модели, при этом формулы для расчета потерь остаются неизменными.

Ключевые слова: тензорный анализ, компьютерная сеть, энтропия, тензор преобразования, матрица связей.

TENSOR MODEL FOR LOSSES ACCOUNTING IN ENTERPRISE COMPUTER NETWORK

Y. Y. Bizyanov [✉], I. V. Rybalka

Donbas State Technical University

[✉]*E-mail: bpeeecs@gmail.com*

The article presents a tensor model for losses accounting in the transmission of data packets in a computer network of an enterprise and rationale for its use in the analysis that is based on tensor methodology. Formulas for calculating the data packets losses in the computer network nodes for an enterprise and its departments, as well as for a given path in a computer network are proposed. An example of a tensor model for calculating the data packets losses for the current state of a computer network and in the case of its expansion is given. It is shown that changing the computer network of an enterprise requires the modernization of only one matrix in the model, while the formulas for calculating losses remain unchanged.

Keywords: tensor analysis, computer network, entropy, tensor transformation, matrix of connections.

Введение

Взаимодействие компьютеров в современных информационных системах предприятий и организаций организовано с помощью компьютерных сетей. Компьютерная сеть (КС) – это совокупность аппаратных средств, линий связи и специализированного программного обеспечения [1]. Чем сложнее структура КС, тем выше вероятность возникновения потерь при передаче данных, поэтому оценка величины потерь с целью последующего их устранения или минимизации является актуальной задачей.

Потери данных происходят, когда один или несколько пакетов данных, перемещающихся по КС, не могут быть доставлены к месту назначения. Потеря пакетов может быть вызвана также переполнением буфера маршрутизатора, несовпадением контрольной суммы, отсутствием доступного пути к узлу назначения, электромагнитными помехами и т. п. [1]. Значительную часть из перечисленных видов потерь можно устранить путем модернизации оборудования и линий связи, а также с помощью настройки программного обеспечения. Однако при расширении КС и модификации оборудования оценку потерь необходимо про-

изводить повторно в полном объеме, что в условиях разветвленной сети крупного промышленного предприятия является сложной задачей.

На данный момент существуют программы (например, WinMTR, Nmap и др.) для определения потерь пакетов данных и узлов, в которых они возникают, отслеживания и отображения с помощью журналов списков и узлов сети, а также процентов потерь для каждого из них. Однако по мере возрастания сложности КС задача анализа потерь в ней также усложняется, требуется многократное моделирование с различными параметрами сети с целью выбора оптимального решения.

Одним из путей решения задач анализа сложных систем является использование тензорной методологии [2], позволяющей объединить в единое целое структурные и функциональные характеристики КС, информационной системы и предприятия. Именно поэтому в современных исследованиях, посвященных анализу КС, тензорной методологии уделяется все больше внимания.

Так, в [3] тензорный анализ применяется для оценки эффективности работы информационной системы управления фирмой с использованием в качестве исходных данных узловой топологии. На основании разработанной в [3] модели в [4] предложена программа, позволяющая определить, какие именно параметры необходимо улучшить для увеличения производительности всей системы.

В [5] предложен метод оценки вероятностно-временных характеристик сетей обработки информации с использованием тензорной методологии, дающий возможность оценивать такие количественные показатели передачи данных, как среднее время задержки при обслуживании пакета и его дисперсию, а также пропускную способность узлов сети.

В диссертации [6] рассмотрены вопросы моделирования трафика в телекоммуникационных сетях с использованием узлового и контурного тензорных методов, а также методы на основе декомпозиции с целью повышения качества функционирования телекоммуникационных сетей. Телекоммуникационная сеть в [6] представлена системой массового обслуживания, для которой определены такие характеристики, как среднее количество заявок, средняя длина очереди и среднее время пребывания заявок в системе.

Метод оценки вероятностно-временных характеристик сетей обработки информации с использованием тензорного анализа, позволяющего исследовать сети большой размерности, предложен в [7]: для получения характеристик отдельных систем используется узловой метод, а для оценки качественных показателей маршрутов передачи информации в сети – контурный.

В [3–6, 8] использованы различные инварианты: в [3–5] в качестве инварианта рассмотрена структура сети; в [6] – функциональные уравнения, описывающие характеристики объектов сети; в [8] – загрузка системы. При этом в каждом исследовании рассмотрены идеализированные КС без учета потерь данных.

Целью данной работы является разработка тензорной модели учета потерь в компьютерной сети предприятия.

Постановка задачи

К причинам возникновения потерь пакетов данных в КС относят [1]: переполнение входных буферов сетевых устройств; несовпадение контрольной суммы; отсутствие доступного пути к узлу назначения; перегрузки коммутаторов; узкие места в составном пути; высокую частоту возникновения ошибок по битам; радиочастотные помехи и радиосигналы, неисправность сетевого оборудования и/или неисправность сетевых драйверов; превышение допустимого количества транзитных узлов.

При построении тензорной модели КС будем учитывать перспективу ее развития, а именно:

- возможность расширения КС в будущем: увеличение количества узлов (коммутаторов, маршрутизаторов), точек доступа (персональных компьютеров, серверов, терминалов);
- возможность увеличения длины линий связи;
- возможность обновления оборудования и программного обеспечения.

Величину потерь пакетов в КС будем задавать в точках доступа. Оценку величины потерь можно произвести, используя журналы передачи пакетов данных, сформированные служебными программами операционной системы или задав вероятность их возникновения. При этом необходимо учитывать следующие факторы: количество узлов между отправителем и получателем, количество точек доступа в узлах, интенсивность трафика в промежуточных узлах, длину линий связи и т. п.

Тензорная модель компьютерной сети с учетом потерь

Представим КС в виде трехмерного пространства-структуры, включающего узлы КС, точки доступа КС и подразделения предприятия. Таким образом, каждая группа элементов, перечисленная выше, определяет в рамках рассматриваемого пространства-структуры собственную координату.

Представим КС в виде множества:

$$CN = \{\vec{U}, C, AP\},$$

где CN – компьютерная сеть;

$\vec{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)$, $n = \overline{1, N}$ – вектор подразделений (отделы, цехи и т. п.) предприятия;

N – количество подразделений;

$C = \downarrow U \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ \dots & C_k \end{bmatrix}$, $k = \overline{1, K}$ – матрица узлов, сгруппированных по подразделениям;

K – количество узлов КС;

$AP = \downarrow U \begin{bmatrix} AP_1 & AP_2 \\ \dots & AP_m \end{bmatrix}$, $m = \overline{1, M}$ – матрица точек доступа, сгруппированных по подразделениям;

делениям;

M – количество точек доступа КС.

Связи в КС представим в виде трехмерной матрицы (рис. 1).

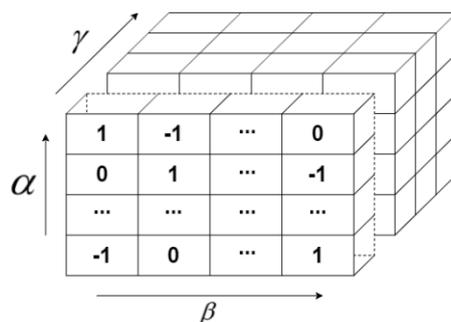


Рис. 1. Матрица связей компьютерной сети

Примечание: построено авторами.

Каждый элемент матрицы связи заполняется следующим образом:

$$N_{\alpha\beta\gamma} = \begin{cases} -1, & \text{если узел отправляет пакеты с данными;} \\ 0, & \text{если узел не участвует в отправке данных по этой связи;} \\ 1, & \text{если узел принимает пакеты с данными.} \end{cases} \quad (1)$$

где α – скользящий индекс, обозначающий узлы КС;

β – скользящий индекс, соответствующий точкам доступа КС;

γ – скользящий индекс, отражающий подразделения предприятия.

Из рисунка 1 видно, что узлы и точки доступа в КС сопоставлены с подразделениями, в которых они установлены, и матрица связей для подразделения \mathbf{U}_γ может выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{U}_\gamma = \alpha \downarrow \begin{matrix} & \xrightarrow{\beta} \\ \begin{bmatrix} -1 & 1 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & -1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

Если нет возможности получить величину потерь пакетов в пределах подразделения из журналов операционной системы или оценить ее с помощью специализированных программ, можно оценить вероятность возникновения потерь по формуле Шеннона [7]:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (3)$$

где n – количество узлов КС в подразделении;

p_i – вероятность потери пакетов в i -м узле.

При оценке вероятности потерь по формуле (4) следует учесть, что их величина зависит от следующих факторов:

- времени суток: начало, середина или конец рабочего дня;
- календарной даты: загрузка КС растет в конце месяца, квартала и года;
- длины линий связи: чем больше длина линии связи, тем выше потери.

Величину потерь пакетов в узлах КС в определенном подразделении \mathbf{U}_γ будем определять следующим образом:

$$\vec{\mathbf{P}}_\alpha = |\mathbf{U}_\gamma| \cdot \vec{\mathbf{P}}_\beta, \quad (4)$$

где $\vec{\mathbf{P}}_\alpha$ – вектор потерь пакетов в узлах;

$\vec{\mathbf{P}}_\beta$ – вектор потерь пакетов в точках доступа;

$|\mathbf{U}_\gamma|$ – матрица, элементы которой равны модулю элементов матрицы связей для подразделения.

После каждого тензорного преобразования по формуле (4) результаты будут представлять потери пакетов данных в узлах КС. Таким образом, инвариантом является соотношение:

$$\vec{\mathbf{P}}_{\alpha\beta\gamma} = \vec{\mathbf{P}}_{\alpha\beta\gamma}',$$

где $\vec{\mathbf{P}}_{\alpha\beta\gamma}$ – исходные данные (вектор потерь данных в точках доступа КС);

$\vec{\mathbf{P}}_{\alpha\beta\gamma}'$ – результирующие данные (вектор потерь данных в узлах КС).

Запишем уравнение (4) в развернутом виде:

$$\begin{aligned} P_{\alpha 1} &= U_{11}P_{\beta 1} + U_{12}P_{\beta 2} + U_{1k}P_{\beta k} \\ P_{\alpha 2} &= U_{21}P_{\beta 1} + U_{22}P_{\beta 2} + U_{2k}P_{\beta k} , \\ P_{\alpha n} &= U_{n1}P_{\beta 1} + U_{n2}P_{\beta 2} + U_{nk}P_{\beta k} \end{aligned} \quad (5)$$

где n – количество узлов;

k – количество точек доступа, подключенных к одному коммутатору;

$P_{\beta k}$ – потери в k -той точке доступа.

Уравнение (5) в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha 1} \\ P_{\alpha 2} \\ \dots \\ P_{\alpha n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1k} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{n1} & U_{n2} & \dots & U_{nk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\beta 1} \\ P_{\beta 2} \\ \dots \\ P_{\beta k} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1k} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{n1} & U_{n2} & \dots & U_{nk} \end{bmatrix}$ – тензор преобразования, элементы которого U_{nk} указывают на

наличие связи между оборудованием КС, заполняются согласно (1).

Таким образом, тензор преобразования позволяет получать интегральную оценку величины потерь в КС для различных представлений.

Для определения потерь (информационной энтропии) при передаче данных от одного узла к другому по заданному маршруту необходимо рассчитать потери пакетов в узлах по формуле (4), после чего оценить по формуле (3) потери для заданного маршрута отправки пакетов данных.

Пример расчета потерь в КС с использованием тензорной модели

Рассмотрим пример расчета потерь пакетов данных в КС предприятия для текущей конфигурации и для случая ее расширения. При оценке величины потерь в узлах и точках доступа КС используем гипотетические данные.

Пусть в организационной структуре предприятия имеются три подразделения, в каждом из которых установлены по 2 коммутатора и по 4 точки доступа (персональные компьютеры), кроме того, есть 2 сервера, установленные в вычислительном центре (рис. 2а).

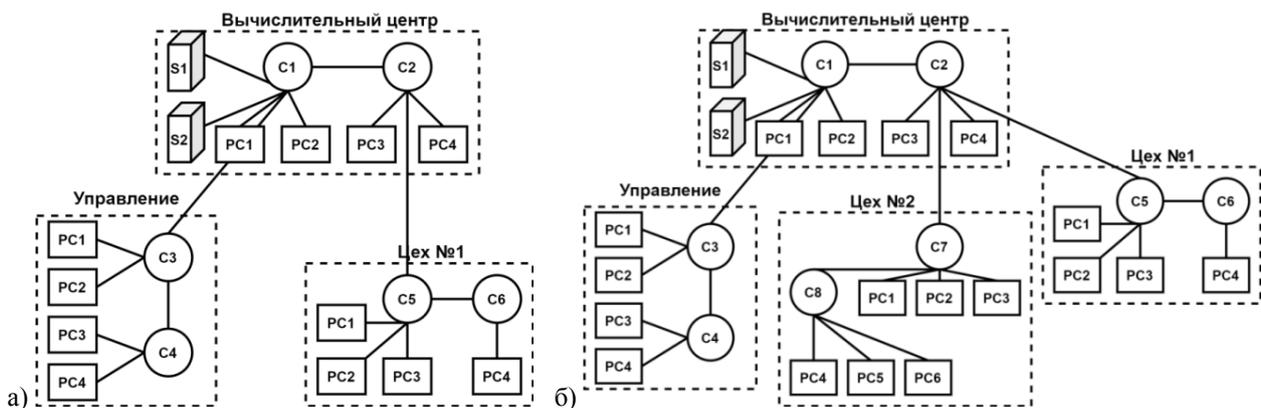


Рис. 2. Структура компьютерной сети предприятия: а – исходная; б – новая
Примечание: построено авторами.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: C_i – коммутатор, где i – его порядковый номер в пределах предприятия; PC_j – персональный компьютер, где j – его порядковый номер в пределах подразделения; S_k – сервер, где k – его порядковый номер в пределах предприятия.

Матрицы, описывающие КС предприятия, будут иметь следующий вид:

$$\vec{U} = (U_1, U_2, U_3),$$

$$C = \downarrow \gamma \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \\ C_5 & C_6 \end{bmatrix},$$

$$AP = \downarrow \gamma \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 \\ AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 & - & - \\ AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 & - & - \end{bmatrix}.$$

С учетом (1), (2) структура КС предприятия описывается трехмерной матрицей:

$$N_{\alpha\beta\gamma} = \alpha \downarrow \left\| \begin{array}{cccccc|ccc|ccc} & & & & & & \beta & & & & & & \\ & & & & & & \rightarrow & & & & & & \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right\|.$$

Предположим, что вектор-столбец \vec{P}_β потерь пакетов данных для каждой точки доступа имеет вид:

$$\vec{P}_\beta^T = \left(\begin{array}{cccccccc} 0,0006; & 0,0005; & 0,0001; & 0,0002; & 0,0005; & 0,0003; & 0,0012; \\ 0,0007; & 0,0001; & 0,0001; & 0,0002; & 0,0002; & 0,0006; & 0,0008 \end{array} \right).$$

Пусть принято решение создать на предприятии еще одно подразделение, в котором будут установлены 2 коммутатора, к каждому из которых будут подключены по 3 точки доступа.

Новая структура КС предприятия представлена на рисунке 2б. Для нее матрицы узлов C и точек доступа AP имеют следующий вид:

$$C = \downarrow \gamma \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \\ C_5 & C_6 \\ C_7 & C_8 \end{bmatrix},$$

$$AP = \downarrow \gamma \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 \\ AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 & - & - \\ AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 & - & - \\ AP_1 & AP_2 & AP_3 & AP_4 & AP_5 & AP_6 \end{bmatrix},$$

а матрица связей для нового подразделения:

$$U_4 = \alpha \downarrow \left[\begin{array}{cccccc} & & & & & \beta \\ & & & & & \rightarrow \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right],$$

откуда матрица, описывающая структуру КС:

$$N_{\alpha\beta\gamma} = \alpha \downarrow \left\| \begin{array}{cccc|cccc|cccc|cccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right\|.$$

Пусть вектор-столбец $\overrightarrow{\mathbf{P}}_{U_4}$ потерь пакетов в точках доступа для нового подразделения предприятия

$$\overrightarrow{\mathbf{P}}_{U_4}^{\rightarrow\tau} = \begin{matrix} \beta \rightarrow \\ (0,0002; 0,0004; 0,0001; 0,001; 0,002; 0,009), \end{matrix}$$

тогда вектор потерь $\overrightarrow{\mathbf{P}}_{\beta}$ примет следующий вид:

$$\overrightarrow{\mathbf{P}}_{\beta}^{\rightarrow\tau} = \begin{matrix} \beta \rightarrow \\ \left(\begin{array}{cccccccccccc} 0,0006; 0,0005; 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,0003; 0,0012; 0,0007; 0,0001; 0,0001; \\ 0,0002; 0,0002; 0,0006; 0,0008; 0,0002; 0,0004; 0,0001; 0,001; 0,002; 0,0009 \end{array} \right) \end{matrix}.$$

Рассчитаем потери в узлах $\overrightarrow{\mathbf{P}}_{U_3}$ для третьего подразделения предприятия по формуле (5):

$$\overrightarrow{\mathbf{P}}_{U_3} = \begin{matrix} \beta \rightarrow \\ \left| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right| \cdot \begin{matrix} 0,0002 \\ 0,0002 \\ 0,0006 \\ 0,0008 \end{matrix} = \begin{matrix} 0,0016 \\ 0,0002 \end{matrix} \end{matrix}. \quad (6)$$

Используя вектор (6) потерь в узлах КС, рассчитаем информационную энтропию для третьего подразделения по формуле (3):

$$H_{U_3} = -(0,0016 \cdot \log(0,0016) + 0,0002 \cdot \log(0,0002)) = 0,0173.$$

Аналогичные действия выполним и для других подразделений, тогда вектор потерь в узлах КС:

$$\overrightarrow{\mathbf{P}}_{\alpha}^{\rightarrow\tau} = (0,0014; 0,0008; 0,0013; 0,0008; 0,0016; 0,0002; 0,0007; 0,0039). \quad (7)$$

Таким образом, вектор информационной энтропии для подразделений предприятия:

$$\overrightarrow{\mathbf{H}}_{\gamma} = \gamma \downarrow \begin{matrix} 0,0215 \\ 0,0207 \\ 0,0173 \\ 0,0385 \end{matrix},$$

а энтропия информации для предприятия в целом равна

$$H = 0,0981.$$

Следовательно, потери пакетов для подразделений предприятия составят 2,2 %, 2,1 %, 1,7 % и 3,9 % соответственно, а при пиковой загрузке КС, когда все компьютеры обмениваются между собой пакетами данных, потери в КС предприятия в целом составят 9,8 %. Для снижения потерь пакетов можно рекомендовать заменить коммутатор в четвертом подразделении или добавить еще один, чтобы разгрузить остальные.

Рассчитаем потери пакетов при передаче данных по определенному маршруту, например, $C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_7 \rightarrow C_8$. Потери пакетов в каждом из указанных узлов рассчитаны в (7), а энтропия будет равна

$$H = -\sum_{i=1}^n P_{\alpha_i} \log P_{\alpha_i} = 0,0807.$$

Из полученного результата видно, что регулярная передача пакетов с данными по указанному маршруту неэффективна, так как вероятность потери пакетов составляет 8,1 %. Для снижения потери данных можно соединить узлы C_4 и C_8 напрямую или организовать связь вычислительного центра с другими подразделениями через отдельный маршрутизатор.

Таким образом, при создании нового подразделения на предприятии в трехмерную модель следует добавить слой – двумерную матрицу связей узлов и точек доступа в новом подразделении. В случае же установки нового коммутатора необходимо добавить строку в двумерной матрице соответствующего подразделения (слоя), а в случае добавления точки доступа – столбец.

Следует отметить, что при изменении структуры КС предприятия модификации подлечит только матрица, при этом формулы (2)–(4) для расчета потерь в КС останутся неизменными.

Заключение

Проведенные исследования показали, что развитие компьютерной сети предприятия вызывает необходимость расширения состава аппаратных средств и программного обеспечения, удлинения линий связи, а усложнение компьютерной сети приводит к росту потерь данных при их передаче.

Предложено задать описание компьютерной сети предприятия в виде трехмерной матрицы, что позволит произвести оценку величины потерь в точках доступа и узлах сети, а также на уровне отдельных подразделений и для предприятия в целом.

Для оценки величины потерь пакетов данных предложены формулы, применение которых показано на примере оценки потерь данных для компьютерной сети предприятия в двух ее состояниях. Показано, что при изменении организационной структуры предприятия, вызывающем изменение конфигурации компьютерной сети, модификации подлечит только трехмерная матрица, описывающая структуру компьютерной сети, а расчетные формулы остаются неизменными.

Литература

1. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. СПб. : Питер, 2001. 672 с.
2. Крон Г. Тензорный анализ сетей ; пер. с англ. / под ред. Л. Т. Кузина, П. Г. Кузнецова. М. : Сов. радио, 1978. 720 с.
3. Петров М. Н., Треногин Н. Г. Тензорный метод анализа эффективности информационных систем управления бизнес-компаний телекоммуникационной отрасли // Сибирский журнал науки и технологии. 2007. № 4. С. 25–27.
4. Петров М. Н., Треногин Н. Г., Веловатый Е. А. Описание технической архитектуры системы управления предприятием связи с использованием тензорной методологии анализа систем // Сибирский журнал науки и технологии. 2011. № 5. С. 95–100.
5. Петров М. Н., Пономарев Д. Ю. Об одном методе оценки вероятностно-временных характеристик сетей обработки информации // Сибирский журнал науки и технологии. 2007. № 4. С. 28–31.

6. Соловская И. Н. Тензорные методы моделирования трафика в телекоммуникационных сетях : дис. ... канд. технич. наук. Одесса, 2015. 242 с.
7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М. : Изд-во иностран. лит., 1963. 830 с.
8. Пономарев Д. Ю. Оценка среднего времени задержки в инфокоммуникационных сетях с использованием методов тензорного анализа // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4. С. 155–167.