

КОНТУРНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СЕТЕЙ VPN

Гутковская О.Л.¹, Пономарев Д.Ю.¹

¹ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, Россия (660014, Красноярский край, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31), e-mail: olg-gutkovskaya@yandex.ru, ponomarevdu@yandex.ru

Услуга виртуальных частных сетей является (VPN – virtual private network) одной из востребованных услуг на телекоммуникационном рынке, позволяя организовать виртуальные каналы между офисами компании, при этом гарантируя заданное качество обслуживания при передаче трафика от различных приложений. Эффективной технологией для организации услуг VPN является технология многопротокольной коммутации по меткам (MPLS – multiprotocol label switching), но, несмотря на возможности технологии перед внедрением новой VPN или при проектировании сети, необходимо определиться с количеством виртуальных каналов между отдельными сайтами и параметрами каждого виртуального канала, такими как скорость, задержка и допустимая вероятность потерь пакетов. В связи с чем в статье предложен метод получения математической модели распределения трафика между сайтами виртуальных частных сетей на основе тензорного метода. Особенностью предлагаемого метода является учет процессно-структурного взаимодействия при формировании математической модели распределения информационных потоков в VPN-сетях.

Ключевые слова: сети VPN, тензорный анализ, распределение трафика.

THE MESH METHOD OF ANALYSIS OF VIRTUAL PRIVATE NETWORKS

Gutkovskaya O.L.¹, Ponomarev D.Y.¹

¹FSBEI HPE «Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev», Krasnoyarsk, Russia, (660014, Krasnoyarsk, prospect imeni gazeti «Krasnoyarskiy rabochiy», 31), e-mail: olg-gutkovskaya@yandex.ru, ponomarevdu@yandex.ru

The service is a virtual private network (VPN - virtual private network) one of the most popular services in the telecommunications market, allowing to organize virtual channels between the offices of the company, while ensuring quality of service specified in the transmission of traffic from different applications. Effective technologies for VPN services is Multiprotocol Label Switching technology, but despite the possibility of technology before implementing a VPN or network design is necessary to determine the number of virtual channels between the individual sites and the parameters of each virtual channel, such as, speed, latency and packet loss probability permissible. In connection with what the article proposed a method for obtaining the mathematical model of the distribution of traffic between the sites of virtual private networks based on tensor method. A feature of this method is the accounting process-structure interaction in the formation of a mathematical model of the distribution of information flows in VPN networks.

Keywords: VPN networks, tensor analysis, traffic engineering.

В общем случае под виртуальными частными сетями понимается услуга, предоставляемая провайдером, для объединения в единое информационное пространство территориально разнесенных сетей (сайтов в терминологии VPN) филиалов какой-либо организации [5]. Для организации связи между филиалами одной организации, которым необходим обмен данными без гарантий качества обслуживания (QoS – quality of service), подойдет простой доступ к сети Интернет по выделенной линии, а для связи между филиалами можно использовать любой туннельный протокол. При использовании в филиалах голосовых и видеосервисов поддержка механизмов QoS крайне важна, и в таких случаях в качестве основы организации VPN могут быть использованы либо выделенные

каналы связи на базе технологий SDH или PDH, либо технологии канального или сетевого уровней [5].

Существующие тенденции развития управляющих функций потоками трафика и унификации протоколов управления, реализованные в концепциях сетей следующего поколения NGN [1; 5], позволяют судить о том, что выбор метода определения маршрута между точкой входа и выхода трафика из сети для реализации управляющих функций должен быть централизованным и базироваться на алгоритмах, способных в реальном времени отслеживать состояние сети и принимать решение о маршрутах продвижения пакетов данных. В связи с чем разработка новых методов анализа и управления трафиком в сетях VPN является актуальной задачей.

Существующие методы анализа сетей VPN базируются либо на граф-комбинаторных алгоритмах [5], либо на математическом аппарате теории массового обслуживания или сетей Маркова [1]. В данной статье предложен другой подход к получению математической модели сети VPN на основе тензорного анализа [3], согласно которому сеть можно рассматривать как совокупность геометрических объектов в пространстве, размерность которого определяется топологией сети. Преимуществом данного подхода является простота алгоритма получения математической модели, описывающей состояние сети в виде системы линейных уравнений, решение которого в зависимости от накладываемых ограничений обеспечивает оптимальное распределение трафика между сайтами VPN-сети.

1. Постановка задачи

Исходными данными для анализа VPN-сети служит топология сети провайдера, предоставляющего услуги VPN, матрица запросов между отдельными сайтами VPN, потоки между сайтами VPN, как правило, задаются в виде матрицы запросов, представляющей собой матрицу размерности $D \times D$, где элемент d_{ij} показывает интенсивность потока от i -го сайта до j -го сайта одной сети VPN.

Анализируемыми характеристиками являются потоки трафика и загрузка каналов связи при ограничениях на параметры качества обслуживания. В результате анализа будут предложены маршруты прохождения трафика между каждой парой сайтов. Пусть топология сети провайдера представлена в виде ориентированного графа $G(N,A)$, где каждое ребро графа определяет однонаправленный канал связи. Как известно из теории массового обслуживания, в качестве математической модели однонаправленного двухточечного канала связи может выступать одноканальная система массового обслуживания, так как алгоритм обслуживания пакетов в интерфейсе маршрутизатора/коммутатора соответствует модели обслуживания одноканальной СМО. Таким образом, в качестве модели всей сети выступает сеть массового обслуживания. Граф сети массового обслуживания может быть описан

матрицей инцидентности I , каждый элемент которой равен -1 или 1 и показывает: входит или выходит ветвь i из узла j . С целью удовлетворения условия сохранения потока необходимо все узлы, которые инцидентны только одной ветви, объединить в один узел, тем самым сеть преобразуется в контурную сеть [2]. В результате матрица инцидентности будет иметь на $n-1$ строку меньше, чем исходная, где n число объединяемых узлов, новая строка матрицы инцидентности будет равна сумме строк объединяемых узлов.

2. Общий подход к решению задачи тензорным методом

Основной идеей тензорного метода является то, что все топологии, содержащие одинаковое число ветвей, связаны между собой тензором преобразования, в роли которого могут выступать матрица линейно независимых разрезов, или матрица линейно независимых контуров, или объединенная матрица линейно независимых контуров и разрезов.

Поскольку все сети с топологией, состоящей из одинакового числа ветвей, связаны между собой тензором преобразования, то среди множества проекций можно выделить так называемую примитивную сеть [3]. Примитивная сеть состоит из такого же количества ветвей, как и исследуемая сеть, но количество несвязанных компонент в ней также равно числу ветвей, в связи с чем потоки в каждой ветви примитивной сети оказываются независимыми. Топология примитивной контурной сети показана на рисунке 1. Как видно, в примитивной контурной сети каждой контурной интенсивности соответствует интенсивность в соответствующей ветви.

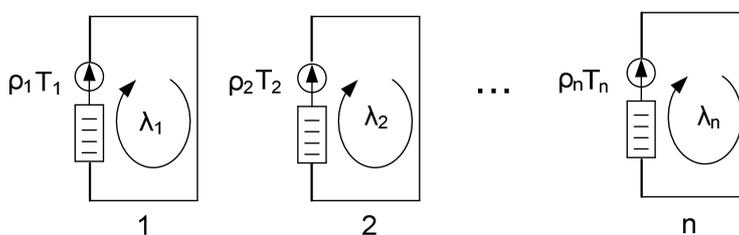


Рис. 1. Примитивная контурная сеть

Если определить математическую модель простейшего элемента сети, которым является одноканальная СМО, как $\rho = t\lambda$, то согласно постулату обобщения Крона математическая модель примитивной сети имеет тривиальный вид и показывает связь контурных интенсивностей с контурными временами обслуживания и контурными нагрузками $\rho_j = t_{ji} \lambda^i$ или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & t_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: λ_i ($i=1\dots n$) – интенсивность поступления, поступающая на вход, элемента сети; t_i ($i=1\dots n$) – среднее время обслуживания; ρ_i ($i=1\dots n$) – загрузка i -го элемента.

Если в качестве базисных элементов для каждой топологии будут использоваться линейно независимые контуры, то тензор преобразования устанавливает связь между контурными интенсивностями одной сети с контурными интенсивностями другой сети. Так, связь контурных интенсивностей примитивной сети связана с контурными интенсивностями исследуемой сети тензором преобразования C : $\tilde{\Lambda}_{\text{примитив_сеть}} = C \Lambda_{\text{исследуемой_сети}}$.

Количество контурных интенсивностей анализируемой сети определяется цикломатическим числом, равным: $p = n - m + 1$.

Тензор преобразования C определяется как матрица линейно независимых контуров. Есть различные методы получения матрицы контуров: граф-комбинаторные и аналитический. Граф-комбинаторные методы основаны на таких алгоритмах, как поиск в глубину и поиск в ширину. Следует отметить, что сложность таких алгоритмов равна $O(N)$, то есть растет линейно с увеличением числа ветвей сети. Аналитический способ предполагает нахождение матрицы контуров как матрицу, ортогональную матрице инцидентности, так как матрица инцидентности является также одной из множеств матриц разрезов, но с одной линейно зависимой строкой. Иными словами, произведение матрицы инцидентности без одной произвольной строки на матрицу линейно независимых контуров дает матрицу с нулевыми элементами. Используя это правило, можно найти матрицу линейно независимых контуров.

В общем случае значение элементов матрицы контуров не имеет значения, главное, чтобы контуры, находящиеся в каждом столбце, были линейно независимыми. Но для расчетов удобным оказывается использование матрицы не просто с линейно независимыми контурами, а с фундаментальными циклами, именно такая матрица и выбрана в качестве тензора преобразования.

Именно матрицы фундаментальных циклов, в отличие от просто матриц линейно независимых контуров, явным образом показывают, что если заданы потоки в контурах примитивной сети, номера которых соответствуют номерам строк, в которых все элементы кроме одного равны нулю, то после преобразования примитивной сети в исследуемую потоки в оставшихся ветвях будут однозначно определены как линейная комбинация заданных потоков. Если же выбрать произвольную матрицу линейно независимых контуров, то такая связь будет неочевидной.

Связь контурных интенсивностей примитивной сети с исследуемой можно, как уже было сказано, записать следующим образом:

$$\lambda^{\bar{i}} = C_i^{\bar{i}} \lambda^i, \quad (2)$$

где $\lambda^{\bar{i}}$ – контурные интенсивности примитивной сети; $C_i^{\bar{i}}$ – тензор преобразования контурных интенсивностей исследуемой сети в контурные интенсивности примитивной сети; λ^i – значение контурных интенсивностей исследуемой сети.

С помощью несложных матричных преобразований можно показать, что вектор контурных загрузок исследуемой сети может быть записан, как: $\rho_i = C_i^{\bar{i}'} \rho_{\bar{i}'}$, и матрица контурных длительностей обслуживания исследуемой сети определена в виде:

$$t_{ji} = t_{\bar{j}\bar{i}'} C_j^{\bar{j}'} C_i^{\bar{i}'}, \quad (3)$$

где C' – тензор преобразования без линейно зависимых строк.

На основании полученных значений контурных загрузок и контурных времен обслуживания значения контурных интенсивностей исследуемой сети можно записать, как:

$$\lambda^i = (t_{ji})^{-1} \rho_j. \quad (4)$$

А значение потоков в каждой ветви можно определить следующим образом:

$$\lambda^{\bar{i}}_{ветвей} = C_i^{\bar{i}} \lambda^i. \quad (5)$$

Поскольку для каждой сети VPN известны свои матрицы запросов, проводя тензорный анализ характеристик для каждой VPN-сети по отдельности, тем самым получив столько систем уравнений типа (4), сколько существует сетей VPN, затем просуммировав одноименные строки всех уравнений, получаем финальную систему уравнений, отражающую зависимость интенсивностей потоков в каждом канале связи от загрузок создаваемой каждой отдельной сетью VPN. Таким образом, если число сетей VPN равно N, то окончательная система уравнений, определяющая потоки всех VPN-сетей в каждой ветви исследуемой сети, будет следующей:

$$\lambda^{\bar{i}}_{ветвей_суммарное} = C_i^{\bar{i}} \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^K \lambda^i_{qp}, \quad (6)$$

где λ^i_{qp} – матрица контурных интенсивностей, создаваемая p-м сайтом q-й VPN-сети.

Система уравнений (6) содержит n уравнений, где n – число ветвей в анализируемой сети, а число неизвестных равно $S \cdot p$, где S – общее число сайтов всех VPN-сетей. Следовательно, система уравнений (6) имеет бесконечное число решений. Это связано с тем, что каждое решение системы уравнений определяет какой-либо маршрут прохождения трафика между сайтами VPN-сетей, а поскольку вариантов прохождения маршрутов существует бесконечное множество, то и система уравнений имеет бесконечное число решений. Систему уравнений (6) можно использовать для анализа трафика VPN двумя

способами. Первый вариант вытекает из того, что в системе (6) потоки в каждой ветви выражаются через линейно независимые загрузки, поэтому определив потоки/загрузки только в линейно независимых ветвях, автоматически определяются и потоки/загрузки в оставшихся ветвях. Второй вариант использования системы уравнений (6) заключается в отыскании какого-либо решения, а не в подборе значений линейно независимых компонент, при этом полученное решение будет описывать маршруты между сайтами VPN, но при таком подходе система уравнений (6) должна решаться с рядом обязательных ограничений в виде системы неравенств. Обязательными ограничениями для системы уравнений (6) являются: неотрицательность потоков создаваемой отдельным сайтом q -й VPN-сети, значение суммарного потока в канале связи не должно превышать величину пропускной способности данного канала, величина потока в ветви n от p -го сайта q -й VPN не должна превышать величину потока, создаваемую p -м сайтом q -ой VPN сети, а также необходимо обеспечить отсутствие появления петлевых маршрутов. Дополнительными ограничениями, накладываемыми на систему уравнений (5), могут быть ограничения сквозной задержки или вероятности потерь каждого типа трафика, создаваемого сайтами VPN-сетей.

Таким образом, решая систему уравнений (6) с учетом неотрицательности потоков или другими ограничениями, накладываемыми на качество обслуживания потоков сетей VPN, а также учитывая значения матриц запросов, можно однозначно определять маршруты прохождения трафика между сайтами VPN-сетей. В свою очередь если решение системы уравнений (6) совместно с накладываемыми ограничениями найти не удастся, то это означает, что данная сеть не может передать то количество трафика, которое генерируется каждой VPN-сетью с требуемым качеством обслуживания.

3. Численные результаты

В качестве примера проведем анализ сети VPN, приведённой на рисунке 2.

На рисунке 2 под условным обозначением УК показаны узлы коммутации, в роли которых, как правило, выступают маршрутизаторы или коммутаторы.

Согласно [4], математическая модель исследуемой сети может быть представлена в виде сети массового обслуживания (рисунок 3).

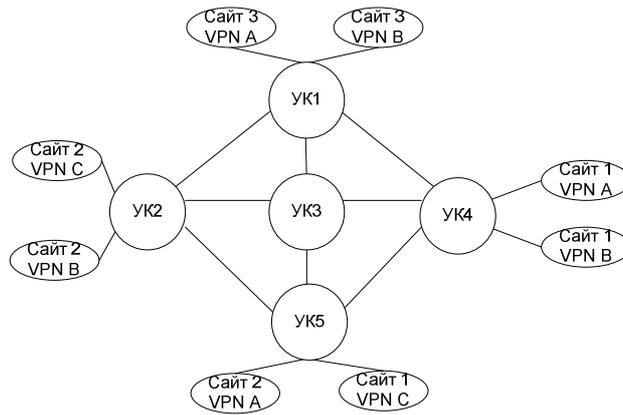


Рис. 2. Пример организации сети VPN

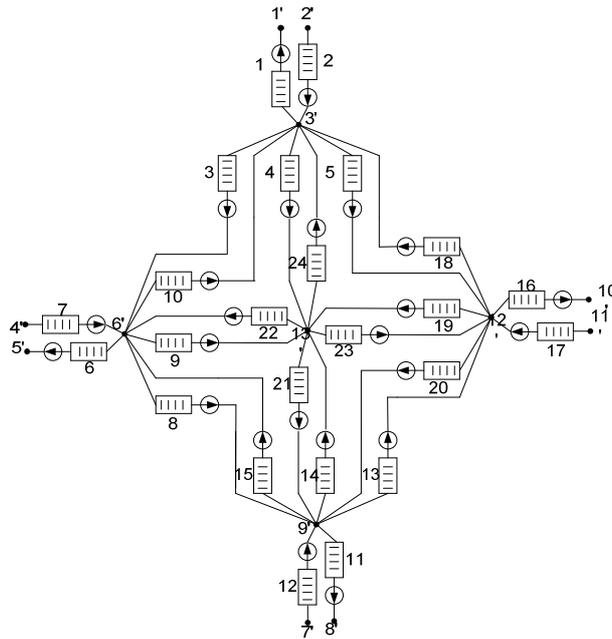


Рис. 3. Сеть массового обслуживания для исследуемой сети

В соответствии с контурным методом анализа узлы 1', 2', 4', 5', 7', 8', 10', 11' объединяются в один узел, после определяется тензор преобразования от структуры исследуемой сети к структуре примитивной сети, который связывает контурные интенсивности исследуемой сети с контурными интенсивностями примитивной. Затем по формулам (2)-(3) определяются контурные загрузки и контурные времена обслуживания. После чего определяются контурные интенсивности анализируемой сети по формуле (4), затем по формуле (5) определяются потоки в каждой ветви, создаваемые p -м сайтом q -й VPN, затем по формуле (6) определяются потоки в каждой ветви, создаваемые всеми сайтами.

В качестве исходных данных определены матрицы запросов сайтов VPN D_A , D_B , D_C

в виде: $D_A = \begin{vmatrix} 0 & 5 & 6 \\ 7 & 0 & 3 \\ 1 & 2 & 0 \end{vmatrix}$, $D_B = \begin{vmatrix} 0 & 8 & 6 \\ 10 & 0 & 3 \\ 15 & 9 & 0 \end{vmatrix}$, $D_C = \begin{vmatrix} 0 & 9 \\ 10 & 0 \end{vmatrix}$. Элементы матриц показывают,

сколько единиц информации в секунду передается от i -го сайта к j -му в рамках одной VPN. Так, элемент матрицы D_A , находящийся в первой строке и втором столбце, показывает, что из первого сайта во второй сайт VPN A будет передаваться 5 ед. инф./с. Время обслуживания одной единицы информации прямо как 0,01 с, что подразумевает скорость 100 единиц в секунду. При таких исходных данных одним из решений системы уравнений (6) соответствует следующее распределение:

$$\Lambda_{1A} = [6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 11 \ 6 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\Lambda_{2A} = [3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 7 \ 3 \ 0 \ 7 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3],$$

$$\Lambda_{3A} = [0 \ 3 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\Lambda_{1B} = [6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 14 \ 6 \ 8 \ 0 \ 0 \ 8 \ 0 \ 0],$$

$$\Lambda_{2B} = [3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 13 \ 0 \ 10 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0],$$

$$\Lambda_{3B} = [0 \ 24 \ 15 \ 0 \ 9 \ 15 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\Lambda_{1C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 10 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$\Lambda_{2C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 9 \ 0 \ 0 \ 9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Каждый вектор показывает, какая интенсивность в ветвях создается p -м сайтом VPN_q. Суммарный вектор интенсивностей для каждой ветви представлен в таблице 1.

Таблица 1

Номер ветви	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Интенсивность поступления	18	27	15	2	10	32	23	10	10	3	17	19
Номер ветви	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Интенсивность поступления	7	3	9	27	25	12	8	5	2	8	10	3

Также при решении данной задачи в качестве ограничений выступало то, что значения элементов векторов Λ_{ij} и $\Lambda_{ветвей}$ должны находиться в диапазоне [0;100). Таким образом, полученное решение удовлетворяет поставленным ограничениям, при этом необходимо отметить, что это одно возможное из множества решений.

Заключение

В данной статье представлен метод исследования сетей VPN с использованием контурного метода анализа. В связи с тем что сетевая структура многих организаций строится именно на базе сетей VPN, провайдеры, предоставляющие данный вид услуг, должны обеспечивать гарантии по качеству обслуживания потоков трафика для каждой

VPN. Большое количество поддерживаемых сайтов VPN и разветвленная инфраструктура сети провайдера делает задачу управления потоками трафика достаточно рутинной, в свою очередь предложенный метод анализа очень хорошо описывает распределения трафика в больших системах благодаря хорошо формализованному матричному математическому аппарату, который остается инвариантным к размеру исследуемой топологии. Также необходимо отметить, что арифметические операции, производимые над матрицами, являются хорошо распараллеливаемыми вычислительными операциями, что позволит на многопроцессорных системах сократить время анализа сетей VPN. Преимуществами данного подхода по сравнению с существующими методами является простота получения математической модели, сложность вычисления маршрутов между сайтами VPN растет линейно с увеличением числа каналов в сети провайдера, в случае если необходимо провести анализ возможности организации маршрута по конкретным ветвям сети. Но если стоит задача в поиске произвольного маршрута, который будет являться решением системы уравнения (6), то накладываемое ограничение на отсутствие маршрутных петель в каждом маршруте между сайтами VPN увеличивает сложность задачи. Также необходимо отметить, что вид тензора преобразования контурных интенсивностей полностью определяется матрицей линейно независимых циклов исследуемой сети, поэтому в результате исследований сетей VPN с различной структурой контурным методом можно сформулировать несколько требований к выбору матрицы линейно независимых циклов, с целью уменьшения временных затрат на вычисление. В качестве тензора преобразования лучше выбирать матрицу фундаментальных циклов или матрицу линейно независимых циклов, где каждый цикл включает в себя ветвь источника и ветвь получателя, данные утверждения носят исключительно эмпирический характер и требуют дополнительных исследований, выявляющих зависимости алгоритмической сложности от вида матрицы линейно независимых контуров.

Список литературы

1. Гавлиевский С.Л. Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания : дис. ... д-ра техн. наук. – Самара, 2012. – 356 с.
2. Гаипов К.Э., Заленская М.К. Применение тензорного метода двойственных сетей для анализа распределённых систем обработки информации // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. - URL: www.science-education.ru/110-9766 (дата обращения: 22.03.2015).
3. Крон Г. Тензорный анализ сетей. - М. : Сов. радио, 1978. – 719 с.

4. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. – 2009. – № 4. – С. 65-69.
5. Росляков А.В. Виртуальные частные сети. Основы построения и применения. - М. : Эко-Трендз, 2006. – 304 с.

Рецензенты:

Петров М.Н., д.т.н., проф., ФГБОУ ВПО «СибГАУ», г. Красноярск.

Антамошкин А.Н., д.т.н., проф., профессор каф. САиИО ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.