

УДК 621.391

Д.Ю. Пономарев
**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА К
МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

*Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М.Ф. Решетнева
Красноярск, Россия*

В работе рассмотрены основные положения применения тензорного анализа к задаче моделирования телекоммуникационных сетей с целью оценки вероятностно-временных характеристик данных сетей, как показателей качества обслуживания информационных потоков в исследуемых сетях. Технологии современных телекоммуникационных сетей предполагают использование сложных по структуре маршрутов передачи информации, что обусловлено большим количеством устройств и постоянно изменяющейся топологией сети. Для моделирования процессов в телекоммуникационных сетях для оценки качественных показателей, таких, как среднее время задержки или вероятность потерь, обычно используются методы теории массового обслуживания, в которых достаточно сложно ввести информацию о структуре маршрутов передачи. Однако, данную информацию широко используют в графовых методах, учитывающих топологию сети. Тензорный анализ сетей позволяет объединить информацию о процессах, происходящих в отдельных системах сети, и информацию о структуре маршрутов передачи информации. В данной работе рассматриваются особенности применения тензорного анализа к задаче моделирования телекоммуникационных сетей. С этой целью сформулированы основные аксиомы предложенного метода, произведена классификация характеристик и параметров телекоммуникационных сетей с точки зрения тензорного анализа, рассмотрены методы и модели применения тензорного анализа к поставленной задаче, разработан алгоритм применения рассмотренного подхода к решению задачи моделирования телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: тензорный анализ сетей, телекоммуникационная сеть, качество обслуживания, вероятностно-временные характеристики, система массового обслуживания

Введение. Телекоммуникационные сети в современном обществе формируют основу для создания пространства информационного обмена как между отдельными пользователями или отдельными системами, так и целыми сообществами или информационными ресурсами [1]. Таким образом, несколько меняется роль телекоммуникаций, развитие которых привело к появлению новой технической области – инфокоммуникаций.

Однако, с целью предоставления инфокоммуникационных услуг с должным уровнем качества обслуживания (QoS – Quality of Service) необходимо обеспечить оценку показателей QoS, основными из которых являются: вероятность потери пакета и среднее время задержки пакета в системе [2].

Для оценки качественных показателей телекоммуникационных сетей обычно используются методы анализа сетей массового обслуживания. Для получения результата телекоммуникационные сети представлены в виде набора систем массового обслуживания для которых определяются вероятностно-временные характеристики, как показатели QoS. С этой целью широко применяются различные методы теории массового обслуживания [3].

Основная сложность применения методов теории массового обслуживания заключается в высокой трудоемкости расчетов и необходимости, при изменении структуры сети или параметров элементов, получать новое решение. Также следует отметить, что в методах данной теории рассматриваются в основном процессы, происходящие при обслуживании информационных потоков в отдельных системах, без учета структуры сети.

Таким образом, учитывая требования по поддержке заданного уровня качественных показателей телекоммуникационных сетей, сложную и динамически изменяющуюся топологию данных сетей, использование различных технологий и протоколов в современных инфокоммуникациях, актуальной является задача оценки ВВХ телекоммуникационных сетей, как показателей качества обслуживания информационных потоков в рассматриваемых сетях.

В данной работе предлагается для оценки ВВХ телекоммуникационных сетей использовать тензорный анализ сетей [4-5], позволяющий, во-первых, учитывать в математических моделях сетей взаимодействие процессов в элементах и структуры сети; и, во-вторых, обеспечить инвариантность методов анализа сетей относительно преобразований их структуры или параметров элементов. Основой тензорного анализа сетей являются аксиомы, смысл которых заключается в том, что: объединение отдельных элементов в единую сеть не приводит к появлению новых физических процессов, отсутствующих в примитивном элементе; уравнение, которое описывает поведение сети, является инвариантным относительно преобразований исследуемой сети; при изменении структуры исследуемой сети изменяются только элементы инвариантного уравнения, которые определяются тензором перехода [4-5]. Дальнейшее развитие идеи такого подхода к анализу сетей, в т.ч. информационных и телекоммуникационных, получили в работах Петрова М.Н., Арменского А.Е., Лемешко А.В. [6] и др.

Основные положения тензорного анализа телекоммуникационных сетей. При использовании инвариантного моделирования к задаче исследования телекоммуникационных сетей аксиомы тензорного анализа формулируются следующим образом.

Процессы обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, описываемые моделями теории массового обслуживания, в основном определяются дисциплиной обслуживания частной системы и, поэтому, анализ распределения трафика в сети может быть проведен с использованием известных выражений для простейшего элемента и дальнейшим их использованием в уравнении для сети путем замены величин, входящих в данные выражения на матричные переменные соответствующей размерности. Смысл этой аксиомы заключается в том, что уравнения, описывающие процессы, протекающие в сложной системе (сети), могут быть получены из уравнений простейших элементов системы, так как при объединении элементов в систему не возникают новые физические явления, в системе происходят те же процессы что и в простых элементах. Таким образом, тензорная методология позволяет находить параметры сложных систем (т.е. сетей) путем анализа их частей или проектировать новые сети за счет объединения ранее исследованных.

Следующая аксиома тензорного анализа формулируется так: описание телекоммуникационных сетей, содержащих n систем, в разных системах координат содержит одинаковое число матричных переменных и имеет одинаковый вид. Отличия заключаются лишь в численных значениях элементов матричных переменных, таких как: загрузка, длительность обслуживания, среднее число требований и т.д. При этом переход от одной системы координат к другой производится использованием матриц перехода, получение которых является простой и легко формализуемой процедурой. Таким образом, для любой телекоммуникационной сети существует возможность провести простую процедуру преобразования для рассмотрения задачи оценки ВВХ в такой системе координат, которая является более удобной для наблюдения и исследования, при этом численные значения матричных переменных изменяются по известному алгоритму. Причем новая система координат позволяет легко составлять уравнения состояния элементов. Для применения полученных в результате анализа уравнений к исходной системе следует вернуться к первоначальной системе координат.

Характеристики и параметры телекоммуникационных сетей. Как известно, основными характеристиками телекоммуникационных сетей с точки зрения эксплуатации являются временные задержки [2]. Эмпирически данные характеристики можно получить путем проведения различных измерений на сети. Как было отмечено ранее, для аналитического же исследования телекоммуникационных сетей обычно используют аппарат теории массового обслуживания.

В теории массового обслуживания среднее время задержки или время нахождения в очереди определяется из среднего числа требований (в

системе или в очереди) путем применения закона Литтла. Среднее число требований в свою очередь находится из вероятностей нахождения в системе или в очереди некоторого числа требований. Т.е. с точки зрения теории массового обслуживания для нахождения временных характеристик необходимо сначала найти распределение вероятностей для каждой системы сети, что сопряжено с некоторыми трудностями. С другой стороны, в теории массового обслуживания вероятностно-временные характеристики обычно рассматриваются, как функциональные зависимости от загрузки [3].

Таким образом, можно отметить, что обслуживание потока вызовов определенной интенсивности поступления вызывает ее загрузку, значение которой определяет величину очереди и время задержки.

Исходя из вышесказанного проведем анализ характеристик телекоммуникационных сетей с точки зрения возможности применения тензорного анализа сетей.

В первую группу характеристик, назовем их потоковыми, как связанными с потоком поступления пакетов, будут входить: интенсивность поступления пакетов (среднее число пакетов в единицу времени) λ , среднее число вызовов в час \bar{c} , скорость поступления информации (например, в бит/с) b . С точки зрения тензорного анализа сетей, данные величины являются продольными [4-5].

Вторая группа характеристик это рассматриваемые, как поперечные величины, которые назовем системными, как определяемыми для системы: загрузка ρ , среднее число требований в системе \bar{N} , интенсивность поступающей нагрузки в Эрл: $y = m\rho$ (m – число обслуживающих приборов).

В соответствии с основными положениями тензорного анализа сетей [4-5], потоковые характеристики относятся к контравариантным, системные к ковариантным. При этом воздействие величин первой группы приводит к возникновению отклика в системах в виде величин второй группы.

Системы же, на которые происходит воздействие, обладают параметрами, которые вызывают изменение величин отклика. К таким параметрам относятся: средняя длительность обслуживания \bar{x} ,

интенсивность обслуживания $\mu = \frac{1}{\bar{x}}$, среднее время задержки пакета в

системе \bar{T} , пропускная способность системы $B = \frac{1}{\bar{t}}$ (\bar{t} – время передачи информационной единицы, например одного бита или одного пакета).

Таким образом, можно определить законы взаимосвязи величин обеих групп через параметры системы. Загрузка системы определяется, как: $\rho = \lambda \bar{x}$. Среднее число требований в системе находится по закону Литтла: $\bar{N} = \lambda \bar{T}$; интенсивность нагрузки, выраженная в эрлангах, задается, как: $y = \bar{c} \bar{x}$. Загрузку канала сети передачи данных можно выразить, как: $\rho = b \bar{t}$. Проводя аналогию с тензорным анализом сетей Крона, данные формулы можно использовать для контурного метода [7-9].

При этом для каждого из вышеприведенных выражений можно определить и обратные формулы, которые можно использовать в узловом методе тензорного анализа телекоммуникационных сетей [7-10]:

$$\lambda = \mu \rho, \quad \lambda = \mu y, \quad b = V \rho.$$

Представленные выражения могут описывать, как отдельный элемент, так и всю сеть, т.е. выполняется первая аксиома тензорного анализа сетей. Представление данных формул в матричной форме соответствует второй аксиоме.

Для того, чтобы применить данное выражение к компьютерным сетям необходимо определить простейший элемент сети, т.е. рассмотреть узлы исследуемой сети в виде математических моделей.

Модели телекоммуникационных сетей. В соответствии с принятой моделью взаимодействия систем, для телекоммуникационных сетей можно определить структуры связей между элементами для следующих уровней: физический, каналный, сетевой, транспортный. Таким образом, в зависимости от уровня модели взаимодействия одна телекоммуникационная сеть может быть представлена набором разных структур.

На физическом уровне телекоммуникационной сети обеспечивается связь между устройствами и системами посредством физической среды. Таким образом, данный уровень позволяет определить структуру физических соединений между элементами телекоммуникационной сети и, тогда, для моделирования физического интерфейса можно использовать одноканальную систему массового обслуживания (СМО) с условными или комбинированными потерями.

Верхние уровни телекоммуникационной сети предполагают использование логических интерфейсов и передачу информации в виде отдельных блоков: пакетов, ячеек, кадров, сегментов и т.д. В таком случае требуется учитывать направления передачи к отдельным элементам сети. Каждое направление может быть представлено в виде СМО, тип которой будет задан конкретной дисциплиной обслуживания моделируемой системы распределения информации. Естественно, что ВВХ систем представлены, как функциональные зависимости от загрузки:

$$P_{\text{потерь}} = f(\rho) \text{ и } T_{\text{задержки}} = f(\rho).$$

Тогда, при рассчитанных величинах загрузки можно найти искомые характеристики для каждой СМО модели сети, а определив значения ВВХ для каждой системы с учетом их загрузки можно использовать их для получения значений показателей QoS на следующем уровне с учетом распределения потоков в сети, подчиняющегося таблице маршрутизации. Следовательно, для каждого маршрута передачи можно записать:

$$P_{\text{потерь}} \approx \sum_{i=1}^m P_{\text{потерь},i} \text{ (для малых потерь);}$$

$$T_{\text{задержки}} = \sum_{i=1}^m T_{\text{задержки},i}, \text{ где } m \text{ количество систем, формирующих}$$

рассматриваемый маршрут передачи.

Следует отметить, что в независимости от уровня взаимодействия, общим структурным элементом моделей сети для всех уровней является базовый блок, состоящий из нескольких СМО и имеющий структуру, представленную на Рисунке 1 [7-9].

Входные системы обеспечивают прием блоков информации, которые поступают в систему с интенсивностью $\lambda_{\text{incom},i}$ ($i=1..n$). Системы базового блока с интенсивностью μ_j ($j=1..k$) производят их обслуживание. Интенсивности обслуживания могут быть представлены, как $\mu_j = m\mu_{\text{serv},j}$, где: m - линейность системы, $\mu_{\text{serv},j}$ - интенсивность обслуживания каждой линии (при этом средняя длительность обслуживания определяется, как:

$$\bar{t}_j = \frac{1}{\mu_j}.$$

Выходные системы ($l=1..s$) обеспечивают отправку блоков информации в соответствии с требуемым направлением передачи. Таким образом, можно определить загрузку каждой системы модели:

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j} \text{ (откуда: } \lambda_j = \mu_j \rho_j \text{) или } \rho_j = \lambda_j \bar{t}_j.$$

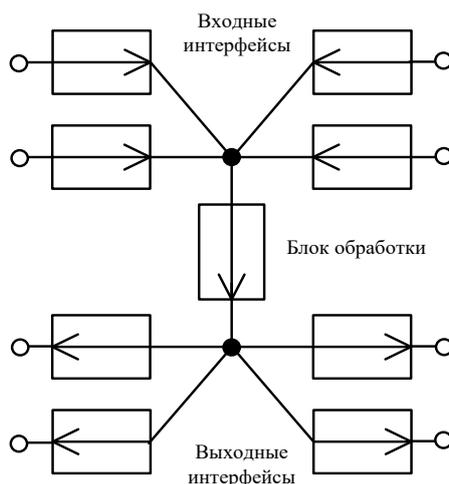


Рисунок 1. Базовый блок

Блок обработки необходим для разделения входных и выходных потоков и является моделью основного процесса обслуживания, например: для коммутатора этот процесс производится в коммутационном элементе, для IP-маршрутизатора этот процесс заключается в многоэтапном обслуживании.

В дальнейшем системы модели телекоммуникационной сети будем называть ветвями с целью отделения этих объектов от телекоммуникационных систем и систем массового обслуживания. Каждая ветвь имеет направление и ограничена двумя узлами. Узел в данном случае рассматривается, как граница ветви.

Анализ ВВХ такого базового блока заключается в определении распределения интенсивностей потоков λ_j внутри блока. Далее, при известных и заданных интенсивностях обслуживания μ_j необходимо рассчитать загрузку каждой системы модели ρ_j и в зависимости от дисциплин обслуживания используемых СМО определить требуемые качественные показатели, такие, как: среднее время задержки \bar{T}_j , среднее число требований в системе \bar{N}_j , распределение вероятностей $p_{j,k}$. Исследуемые характеристики могут быть найдены как для отдельной системы, так и для всего блока в целом. Например, если определены средние задержки для каждой системы, то средняя задержка для всего блока равна: $\bar{T} = \sum_j \bar{T}_j$.

Инвариантные модели телекоммуникационных сетей. Рассматривая потоковые характеристики в ветвях сети, в соответствии с определениями тензорного анализа сетей, как контравариантные (λ, c, b) , для каждой из обозначенных характеристик можно записать:

$$\lambda^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} \lambda^{\alpha}, c^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} c^{\alpha}, b^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} b^{\alpha}.$$

Тензоры преобразований $C_{\alpha}^{\alpha'}$ определяют правило преобразования распределения трафика при модификации структуры сети, что приводит к изменению распределения трафика. Для телекоммуникационных сетей данный тензор описывает структуру путей передачи и обработки информации, что значительно отличает сущность применения тензорного анализа к компьютерным сетям от методов анализа электрических цепей.

Для ковариантных характеристик, таких, как ρ, N, y , правила преобразования записываются в виде:

$$\rho_{\alpha'} = A_{\alpha}^{\alpha'} \rho_{\alpha}, N_{\alpha'} = A_{\alpha}^{\alpha'} N_{\alpha}, y_{\alpha'} = A_{\alpha}^{\alpha'} y_{\alpha}.$$

Тензор преобразования $A_{\alpha}^{\alpha'}$ описывает структуру модели телекоммуникационной сети, т.е. аналогично $C_{\alpha}^{\alpha'}$ обладает физической сущностью. Таким образом, рассматриваемые модели являются геометрическими объектами.

В соответствии с положениями тензорного анализа сетей необходимо определить примитивный элемент сети. В данной работе в качестве такого элемента выбрана отдельная система массового обслуживания. Тогда базовый блок или всю сеть можно преобразовать в примитивную, разведив системы или с точки зрения геометрической интерпретации увеличив расстояние между объектами до бесконечности (Рисунок 2).

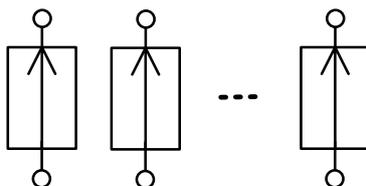


Рисунок 2. Примитивная сеть

Таким образом, примитивная сеть получается из исходной сети путем декомпозиции ее элементов, т.е. является несвязанной. При описании такой сети необходимо учитывать, что отсутствуют связи и влияние между элементами и можно использовать, например, выражения для определения загрузки $\rho = \lambda t$. Для других законов взаимосвязи можно записать аналогично.

Следовательно, для примитивной сети можно записать: $\rho_{\alpha} = t_{\alpha\alpha} \lambda^{\alpha}$. В матричной форме это выражение может быть записано, как: $\mathbf{P} = \mathbf{T}\mathbf{\Lambda}$. С другой стороны, используя обратное выражение $\lambda = \mu\rho$, для примитивной сети можно определить уравнение: $\lambda^{\alpha} = \mu^{\alpha\alpha} \rho_{\alpha}$, или в матричном виде:

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{M}\mathbf{P}.$$

Эти выражения определяют три геометрических вектора описывающих сеть массового обслуживания как модель телекоммуникационной сети, но в данных выражениях представлена только процессная составляющая тензорной модели, т.е. учитывающая только процессы поступления и обслуживания информационных потоков. Однако, для того чтобы определить вероятностно-временные характеристики сети необходимо учитывать ее топологию. Для этого в данной работе используется инвариантное представление модели сети с привлечением тензорного анализа сетей.

Для установления формул преобразования геометрических объектов используются следующие предположения.

Для установления формул преобразования геометрических объектов используются следующие предположения.

В [11] отмечается, что чисто-контурные сети обладают гомологической природой, а чисто-узловые когомологической. При этом инвариант мощности является следствием топологической структуры сети.

В данной работе в качестве инварианта рассматривается произведение среднего числа требований, поступающих в систему, в единицу времени на загрузку $\rho_\beta \lambda^\beta = \rho_{\beta'} \lambda^{\beta'}$, или $\mathbf{P}\mathbf{\Lambda} = \mathbf{P}'\mathbf{\Lambda}'$.

Для исходной сети инвариантное уравнение можно записать, как: $\rho_\alpha = t_{\alpha\alpha} \lambda^\alpha$, а для примитивной: $\rho_\beta = t_{\beta\beta} \lambda^\beta$.

В таком случае, вектор интенсивностей потоков примитивной сети λ можно представить в виде: $\lambda = \sum_{\beta=1}^n l_\beta \lambda^\beta$, где l_β – векторы базиса n -мерного

векторного пространства [11], n – количество систем в примитивной сети.

При объединении систем в единую (исходную) сеть потоки в полученной сети можно представить «при помощи неособенного преобразования Q » [11]:

$$\lambda^\beta = \sum_{\alpha=1}^n Q_\alpha^\beta \lambda^\alpha.$$

Если исходную сеть представить, как чисто-контурную сеть ($\rho_{\beta'} = t_{\beta'\beta'} \lambda^{\beta'}$, где $\lambda^{\beta'}$ – вектор контурных интенсивностей), то матрица преобразования $Q^{-1} = C$ и интенсивности ветвей примитивной сети определяются, как:

$$\lambda^\beta = C_{\beta'}^\beta \lambda^{\beta'}.$$

Аналогично, для вектора загрузок можно записать:

$$\rho_\beta = \sum_{\alpha=1}^n P_\beta^\alpha \rho_\alpha,$$

и матрицы преобразования связаны соотношением:

$$Q = (P^T)^{-1}.$$

Тогда, для гомологического инварианта в соответствии с [11]:

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda^{\beta} \rho_{\beta} = \sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^n P_{\beta}^k \rho_k \sum_{\alpha=1}^n Q_{\alpha}^{\beta} \lambda^{\alpha}.$$

Откуда:

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda^{\beta} \rho_{\beta} = \sum_{k=1}^n \sum_{\alpha=1}^n \left(\sum_{\beta=1}^n P_{\beta}^k Q_{\alpha}^{\beta} \right) \lambda^{\alpha} \rho_k \text{ или } \sum_{\beta=1}^n \lambda^{\beta} \rho_{\beta} = \sum_{k=1}^n \sum_{\alpha=1}^n \delta_{\alpha}^k \lambda^{\alpha} \rho_k = \sum_{\alpha=1}^n \lambda^{\alpha} \rho_{\alpha},$$

что доказывает выбранный инвариант.

Исходя из данных предположений, можно считать, что выполняется соотношение (инвариант):

$$P\Lambda = P'\Lambda',$$

где переменные со штрихом для одной топологии сети, без штриха для другой. Возможность использования данного инварианта подтверждается также результатами моделирования [7-10].

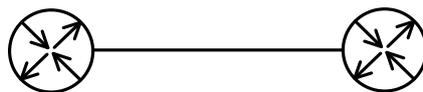
В дальнейшем данный инвариант используется для определения уравнений преобразований геометрических объектов при переходе от одного представления сети к другому, поэтому рассматриваемые модели можно считать инвариантными. Форма уравнений определяется типом сети по структуре связи между ее элементами.

Топологии телекоммуникационных сетей. В телекоммуникационных сетях используются следующие основные виды топологий: полносвязная, древовидная и кольцо. Выбор той или иной топологии при построении сети связан с потребностями пользователей сети, возможностями оператора сети и технико-экономическими показателями. Кроме того, в некоторых случаях применение заданной топологии определяется используемой технологией, видом систем передачи, скоростью применяемой технологии; видом линии связи: оптическая, медная линия связи или беспроводная система передачи. Также, на выбор топологии оказывает влияние и организационно-функциональная роль сети: сеть доступа, агрегации или ядра.

Любое из устройств составляющих телекоммуникационную сеть на любом уровне взаимодействия можно представить в виде базового блока (Рисунок 1). Таким образом, можно определить модель телекоммуникационной сети как сеть массового обслуживания, которая в свою очередь обладает своей топологией.

Например, модель сети, состоящая из двух маршрутизаторов (Рисунок 3а) представлена на Рисунке 3б.

а)



б)

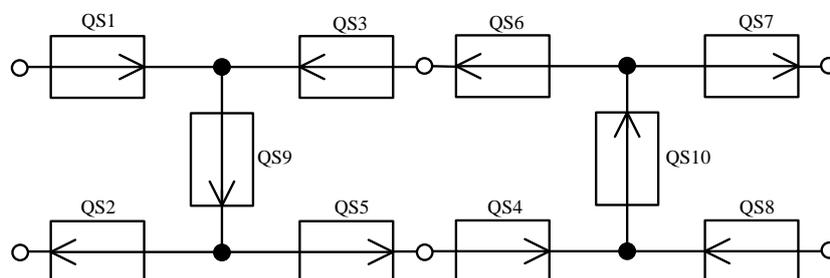


Рисунок 3. Сеть из двух маршрутизаторов (а) и ее модель (б)

Первый маршрутизатор в модели представлен СМО QS1-QS3, QS5, QS9; второй маршрутизатор соответственно: QS4, QS6-QS8, QS10. Информация от пользователей сети поступает через QS1 и QS8, к пользователям информационные потоки направляются через QS2 и QS7. Системы массового обслуживания QS3 и QS4 это входные интерфейсы первого и второго маршрутизаторов соответственно. Системы QS5 и QS6 моделируют выходные интерфейсы маршрутизаторов. Для моделирования работы внутреннего коммутатора маршрутизаторов (коммутационной матрицы или коммутатора любого другого типа) используются СМО QS9 и QS10. При увеличении сетевых интерфейсов необходимо в модель сети добавить в соответствующих местах системы массового обслуживания.

Виды используемых моделей телекоммуникационных сетей. В тензорном анализе принято рассматривать три вида сетей: контурные, узловые и ортогональные.

К контурным [7-9] (Рисунок 4) относятся такие сети, в которых нет неприсоединенных узлов. Соответственно, все системы связаны друг с другом и образуют замкнутые контуры. При необходимости любую сеть можно привести к контурному виду путем введения дополнительных виртуальных связей.

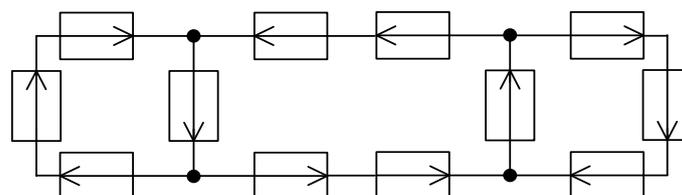


Рисунок 4. Пример контурной сети

Топология узловых сетей [7-10] (Рисунок 5) не содержит замкнутых контуров и в таком случае сеть имеет неприсоединенные узлы отдельных систем. При соответствующих преобразованиях, любая сеть может быть преобразована в узловую вид.

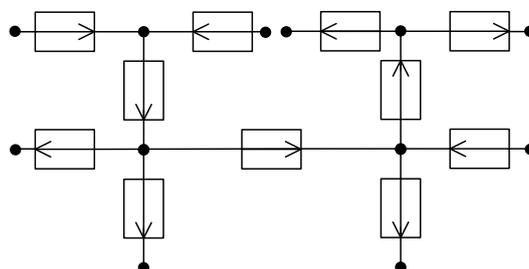


Рисунок 5. Пример узловой сети

Ортогональные сети обладают смешанной топологией, например, такой, как на Рисунке 3 (сеть из двух маршрутизаторов). При анализе сетей такого типа обычно сеть преобразуется к контурному или узловому виду.

В зависимости от типа сети используется соответствующий метод анализа. В данной работе контурный метод основан на том, что интенсивности потоков в ветвях λ (ветвь это отдельный элемент или последовательно включенные системы) вызывают, например, загрузки систем ρ (могут использоваться и другие характеристики), которые находятся, как: $\rho = \lambda t$, где t - длительность обслуживания. В узловом методе загрузки систем вызывают в качестве отклика интенсивности потоков: $\lambda = \mu \rho$, где μ - интенсивность обслуживания. В зависимости от метода изменяются и исходные данные. Для контурного исходными являются в рассматриваемом случае ($\rho = \lambda t$): длительности обслуживания и предварительные значения загрузок; для узлового: интенсивности обслуживания и поступления. В связи с этим использование узлового метода более предпочтительно при анализе телекоммуникационных сетей.

Применение того или иного метода, в любом случае, связано с выявлением линейно-независимых величин, определяющих базис геометрической проекции. В случае контурного метода в данной работе в качестве базиса используется вектор контурных интенсивностей (определяется путями передачи информации по телекоммуникационной сети), а при применении узлового метода вектор узловых загрузок (определяется структурой связей между ветвями). В тензорном анализе базис определяется наблюдателем, поэтому, в общем случае, геометрический объект имеет бесконечное число проекций.

Также, как особенность применения тензорного анализа телекоммуникационных сетей следует отметить, что в отличие от теории Крона Γ ., в исследуемых сетях в качестве источников можно

рассматривать только источники вызовов, как создающие трафик. Поэтому, в данной работе источниками являются источники пакетов (вызовов, ячеек, кадров и т.д.) с интенсивностью λ .

Кроме того, в отличие от электрических цепей, трафик по телекоммуникационной сети передается не произвольно, а с заданными маршрутами между определенными источниками и получателями. Поэтому, во-первых, трафик, созданный определенным источником, обязательно поступает конкретному получателю; во-вторых, распределение трафика происходит в соответствии с заданной маршрутной таблицей.

Следовательно, во-первых, при исследовании телекоммуникационных сетей должно выполняться условие: $\sum_j \lambda_{source,j} = \sum_i \lambda_{destination,i}$, где $\lambda_{source,j}$ - интенсивность j -ого источника, $\lambda_{destination,i}$ - интенсивность i -го получателя; во-вторых, должны быть определены вероятности поступления пакетов в местах разделения трафика: p_{ij} - вероятность поступления пакетов из i -ой системы в j -ую.

Как было указано ранее, вероятности p_{ij} являются заданными маршрутными таблицами. Поэтому, управляя распределением вероятностей можно добиться требуемого распределения трафика, обеспечивающего заданные вероятностно-временные характеристики телекоммуникационных сетей.

Алгоритм применения инвариантного моделирования к задаче исследования телекоммуникационных сетей. В данной работе предлагается следующий алгоритм инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей. Основные этапы, в независимости от используемого метода (контурного или узлового), обеспечивают хорошую формализуемость и невысокую алгоритмическую сложность.

Первый этап заключается в формировании исходной сети, т.е. создании структуры модели телекоммуникационной сети путем использования базовых блоков (Рисунок 1), определения параметров систем (длительности обслуживания, интенсивности обслуживания, пропускной способности и т.д.), определении источников и потребителей трафика.

На втором этапе производится декомпозиции исходной сети с целью формирования примитивной или несвязанной сети. Здесь необходимо учитывать какая модель сети, с каким возбуждением, будет использоваться в дальнейшем, так как требуется обеспечить формирование вспомогательной сети и выбор правил преобразований и параметров систем. Исходная сеть разбивается на отдельные ветви и таким образом преобразуется в примитивную контурную или узловую сеть.

Далее, на третьем этапе, требуется ввести вспомогательную систему координат с помощью, которой определяются в исходной сети базисные компоненты, и вводится топологическая информация. В работе для этого используются контурные интенсивности потоков и узловые загрузки систем соответственно для контурного и узлового методов. Это позволяет сформировать вспомогательную сеть и определить место каждой ветви примитивной сети в исходной.

Четвертый этап анализа заключается в установлении тензора преобразования в виде матрицы перехода для выбранного метода анализа: контурного или узлового. Матрица перехода определяет связь между контурными интенсивностями и интенсивностями отдельных систем или узловыми нагрузками и нагрузками систем. Тензор преобразования находится путем установления участия отдельных ветвей в формировании контурных интенсивностей или узловых нагрузок.

Пятый этап состоит в определении формул преобразования геометрических объектов с помощью величин инвариантных относительно системы координат. Далее необходимо найти численные значения элементов матричных переменных в соответствии с выбранным методом анализа, заданным тензором преобразования и определенным алгоритмом преобразования.

На заключительном этапе необходимо обеспечить нахождение численных значений для вспомогательной системы и произвести их преобразование для исходной сети.

В дальнейшем производится интерпретация результатов для исследуемой телекоммуникационной сети.

Заключение. В работе рассмотрены основные положения по использованию тензорного анализа к задаче исследования телекоммуникационных сетей.

С этой целью сформулированы аксиомы тензорного анализа для данного типа сетей. Первая аксиома тензорного анализа телекоммуникационных сетей определяет то, что процессы обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях могут быть описаны с помощью уравнения поведения простейшего элемента сети. В данном случае, для рассмотренных моделей телекоммуникационных сетей простейшим элементом является несвязанная система массового обслуживания. Вторая аксиома тензорного анализа устанавливает инвариантность формы описания сети. Таким образом, преобразование структур сетей представляет собой, с точки зрения тензорной методологии, преобразование координат геометрических объектов, в качестве которых выступают характеристики телекоммуникационных сетей.

С позиции приложения тензорного анализа к оценке характеристик исследуемых сетей в работе определены потоковые и системные

характеристики. К первым относятся интенсивность поступления пакетов, среднее число вызовов в час, скорость поступления информации. Ко вторым: загрузка, среднее число требований в системе, интенсивность поступающей нагрузки. Поточковые и системные характеристики связаны через параметры системы. В качестве параметров систем рассматриваются следующие величины: средняя длительность обслуживания, интенсивность обслуживания, среднее время задержки пакета в системе, пропускная способность системы.

Для потоковых и системных характеристик телекоммуникационных сетей, рассматриваемых в контексте тензорного анализа, как контравариантные и ковариантные соответственно, определены формулы преобразований. Использование этих формул позволяет ввести топологическую информацию при преобразовании структуры сети. В результате анализа топологий исследуемых телекоммуникационных сетей, определено, что основные модели данных сетей могут быть представлены в контурном или узловом виде. Вид сети устанавливает метод решения задачи оценки характеристик сети.

В качестве основы модели телекоммуникационной сети предложено использовать базовый блок, в состав которого входят системы, моделирующие входящие и исходящие интерфейсы, как физические, так и логические; и блок обработки, который является моделью основного обслуживающего устройства. В модели телекоммуникационной сети данные системы, рассматриваются, как ветви, обладающие направлением и ограниченные узлами.

В соответствии с основными положениями, изложенными в работе, в заключительной части представлен алгоритм применения тензорного анализа телекоммуникационных сетей, позволяющий обеспечить оценку вероятностно-временных характеристик исследуемых сетей и систем. В заключение можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день решение задачи распределения ресурсов телекоммуникационной сети значительно усложняется. Это связано в большей степени с ростом числа устройств данных сетей, вектор развития которых направлен в сторону всепроникающих сенсорных сетей, увеличением количества связей между ними и динамически изменяемой структурой сети. Предлагаемый в работе метод анализа телекоммуникационных сетей, обеспечивающий учет процессно-структурного взаимодействия информационных потоков и топологии сетей, позволит получить решение задачи распределения ресурсов с небольшими вычислительными затратами [12], и, при этом, уменьшить задержки при динамическом управлении сетевыми элементами, обеспечив равномерную загрузку устройств сети, что приведет к снижению времени задержки в транзитных и конечных узлах сети связи и

повышению качества обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014.
2. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. – ITU, 2011.
3. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и её приложения. – М.: Либроком, 2010.
4. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Советское радио, 1978.
5. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей. – М. : ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007.
6. Лемешко А.В. Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 38–54.
7. Пономарев Д.Ю. Тензорная методология в информационных коммуникациях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, 5. – С. 18-23.
8. Ponomarev D. IMS quality of service estimation with tensor concept // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2013. – Т. 6, 4. – С. 462-473.
9. Пономарев Д.Ю. Модель распределения трафика для перспективных инфокоммуникационных спутниковых сетей [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – 1. URL: www.science-education.ru/121-18407 (дата обращения: 15.04.2015).
10. Пономарев Д.Ю. Узловая модель распределения трафика для перспективных спутниковых сетей связи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – 10. – С. 55-58.
11. Мыльников А.А., Прангишвили А.И. Гомологические и когомологические инварианты электрических цепей // Автоматика и телемеханика. – 2002. – 4. – С. 67-75.
12. Васильченко Р.С., Пономарев Д.Ю. Программный комплекс оценки параметров QoS инфокоммуникационных сетей. – ФИПС (Роспатент) : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 21.09.2012. – №2012618595.

D. Ponomarev

FEATURES OF APPLICATION OF TENSOR ANALYSIS TO TELECOMMUNICATION NETWORKS MODELLING

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russia*

The paper considers the main provisions of the application of tensor analysis to the telecommunication networks modeling for the probabilistic and time characteristics estimating of these networks as indicators of the level of quality of service. Technologies of modern telecommunication networks assume the use of structurally complicated information transmission routes, which is caused by a large number of devices and the dynamically changing topology of the network. To simulate processes in telecommunication networks, queuing theory methods are commonly used to estimate QoS indicators, such as the average delay time or the probability of loss, but these methods are not allowed use the information about the structure of transmission routes. However, this information is widely used in graph methods with taking into account the topology of the network. Tensor analysis of networks allows to combine information about the processes occurring in individual network systems, and information about the structure of information transmission routes. In this work, we consider the features of the application of tensor analysis to the problem of the telecommunication networks modeling. For this purpose, the main axioms of the proposed method are formulated, the classification of telecommunication network characteristics and parameters is made from the point of view of tensor analysis, methods and models of tensor analysis are considered, the algorithm for applying the approach to solving the problem of modeling telecommunication networks is developed.

Keywords: tensor analysis of networks, telecommunication network, quality of service, probability and time characteristics, queuing system

REFERENCES

1. Gol'dshteyn B.S., Kucheryavyy A.E. *Seti svyazi post-NGN*. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2014.
2. Recommendation ITU-T Y.1541. *Network performance objectives for IP-based services*. – ITU, 2011.
3. Saati T.L. *Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya*. – M.: Librokom, 2010.
4. Kron G. *Tenzornyy analiz setey*. – M.: Sovetskoe radio, 1978.
5. Petrov A.E. *Tenzornyy metod dvoystvennykh setey*. – M. : ООО «Tsentr informatsionnykh tekhnologiy v prirodopol'zovanii», 2007.
6. Lemeshko A.V., Evseeva O.Yu., Garkusha S.V. *Rezultaty issledovaniya tenzornoy modeli mnogoputevoy marshrutizatsii s obespecheniem kachestva obsluzhivaniya v telekommunikatsionnykh setyakh // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*. – 2013. – Vol. 13, No. 4. – pp. 38–54.

7. Ponomarev D.Yu. Tenzornaya metodologiya v informatsionnykh kommunikatsiyakh // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. – 2012. – Vol. 55, 5. – pp. 18-23.
8. Ponomarev D. IMS quality of service estimation with tensor concept // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2013. – Vol. 6, 4. – pp. 462-473.
9. Ponomarev D.Yu. Model' raspredeleniya trafika dlya perspektivnykh infokommunikatsionnykh sputnikovyykh setey [Elektronnyy resurs] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2015. – 1. URL: www.science-education.ru/121-18407 (data obrashcheniya: 15.04.2015).
10. Ponomarev D.Yu. Uzlovaya model' raspredeleniya trafika dlya perspektivnykh sputnikovyykh setey svyazi // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. – 2015. – 10. – pp. 55-58.
11. Myl'nikov A.A., Prangishvili A.I. Gomologicheskie i kogomologicheskie invarianty elektricheskikh tsepey // Avtomatika i telemekhanika. – 2002. – 4. – pp. 67-75.
12. Vasil'chenko R.S., Ponomarev D.Yu. Programmnyy kompleks otsenki parametrov QoS infokommunikatsionnykh setey. – FIPS (Rospatent) : Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM, 21.09.2012. – No. 2012618595.