

На правах рукописи

Пономарев Дмитрий Юрьевич

**Модели распределения трафика для оценки качественных показателей
телекоммуникационных сетей**

05.12.13. – " Системы, сети и устройства телекоммуникаций "

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск 2018

Работа выполнена в Сибирском государственном университете науки и технологий им. акад. М.Ф.Решетнева

Научный консультант: заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук, профессор Шайдуров Г.Я.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «____» _____ в ____ часов на заседании диссертационного совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Ваш отзыв, заверенный гербовой печатью, просьба направлять по адресу:

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Общая характеристика работы

Современный этап развития современного общества в основном определяется развитием коммуникационных средств, обеспечивающих связь между оконечными пользовательскими устройствами, к которым можно отнести, как мобильные и стационарные телефоны, персональные компьютеры, смартфоны и т.д., так и серверы различного назначения, мэйнфреймы и суперкомпьютеры. Взаимодействие данных устройств позволяет реализовать обработку информационных потоков различного назначения. Однако, для осуществления доступа к современным инфокоммуникационным услугам и формирования глобального информационного пространства необходимо обеспечить коммуникационную среду посредством технологий телекоммуникационных сетей.

Телекоммуникационная сеть (на сегодняшний день к данному типу сетей относятся и сети ЭВМ) это коммуникационная сеть, обеспечивающая взаимодействие различного оконечного оборудования (в т.ч. и компьютеров) с целью использования каких-либо ресурсов, в качестве которых могут выступать: услуги сетей, специализированное оборудование, программное обеспечение или массивы данных. На сегодняшний день телекоммуникационные сети обеспечивают передачу в том числе и мультимедийных информационных потоков.

Основными качественными показателями телекоммуникационных сетей и систем, как показателей их эффективности, являются вероятностно-временные характеристики (среднее время задержки, вероятность потерь и др.), исследованию которых посвящены такие научные направления, как теория массового обслуживания и теория телетрафика. Основной вклад в развитие данных направлений внесли: А.К. Эрланг, Т. Энгсет, К. Пальм, а также отечественные ученые: А.Я. Хинчин, М.А. Шнепс, Ю.Н. Корнышев, Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д.Харкевич и др.

В связи с развитием сетей и систем, обеспечивающих передачу данных, дальнейшее развитие методов анализа данных систем происходило на базе результатов теории телетрафика и теории массового обслуживания. Широко известны, уже ставшие классическими работы Л. Клейнрока, Т. Саати, Л.Такачи, А.А.Боровкова, Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко, Г.П. Башарина, В.А. Ивницкого. Дальнейшее развитие методов анализа инфокоммуникационных сетей, к которым относятся и телекоммуникационные, представлено в работах П.П. Бочарова, Г.П. Захарова, Б.Я. Советова, С.А. Яковлева, О.С. Чугреева, Г.Г. Яновского, С.И. Самойленко, В.Г. Лазарева, Э.А. Якубайтиса, А.А. Назарова, В.М. Вишневого, С.Н. Степанова и др.

Современные телекоммуникационные сети обеспечивают передачу и обработку множества информационных потоков, используя большое количество устройств: коммутаторов, маршрутизаторов, серверов и т.д. Таким образом, структура связей (топология) между обслуживающими системами сети вступает во взаимодействие с процессами поступления информации и распределения трафика. Участие топологии при обслуживании

информационных потоков в телекоммуникационной сети производится путем использования теории графов, а влияние процесса поступления пакетов на обслуживающие системы учитывается с помощью методов теории массового обслуживания. Однако, теория графов позволяет исследовать структуру сети без учета влияния процесса поступления информации, а теория массового обслуживания обеспечивает получение вероятностно-временных характеристик систем с неформализованным учетом влияния структуры. Таким образом, можно сделать вывод о том, что учет процессно-структурного взаимодействия классическими методами исследования обычно не производится.

Возможность учета данного взаимодействия возможно при использовании методов тензорного анализа сетей. Основоположителем тензорного анализа сетей является Г. Крон, который впервые использовал тензорный анализ и топологию в приложении к теории электрических сетей. Дальнейшее развитие идеи тензорного анализа, в т.ч. и для информационных систем, получили в работах Петрова А.Е., Арменского А.Е., Петрова М.Н., Лемешко А.В. и др. Однако, применение тензорного анализа к исследованию телекоммуникационных сетей связано с некоторыми трудностями.

Необходимость учета взаимодействия трафика и структуры сетей связана с усложнением процессов обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, что обуславливается несколькими причинами: большим количеством динамически изменяющихся связей в структуре сетей; возросшим объемом передаваемой информации; ограниченностью пропускных способностей участков сетей и запоминающих устройств в узлах обработки и т.д. Поэтому, обоснованный выбор параметров телекоммуникационных сетей и систем, обеспечивающих качественное обслуживание информационных потоков, что повысит эффективность процессов обработки и передачи данных в таких сетях, является актуальной практической задачей.

Объектом исследования являются процессы обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях.

Диссертация посвящена **научной проблеме** анализа распределения трафика и оценки качественных показателей процессов обработки информационных потоков в телекоммуникационных сетях.

Целью работы является создание методологии и разработка алгоритмического и программного обеспечения формирования инвариантных моделей распределения трафика и процессов обработки информационных потоков в телекоммуникационных сетях.

Частными задачами, решаемыми в диссертационной работе, являются:

1. анализ характеристик и параметров телекоммуникационных сетей и систем, пригодных для формирования инвариантного моделирования;
2. разработка обобщенных инвариантных моделей телекоммуникационных сетей;

3. разработка обобщенного алгоритма применения инвариантного моделирования к задаче оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей;
4. разработка контурных и узловых инвариантных моделей для инженерного расчета вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей;
5. разработка алгоритмического обеспечения, необходимого для создания инвариантных моделей оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей;
6. разработка программного обеспечения для оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей, основанного на предложенных инвариантных моделях;
7. апробация разработанного программного обеспечения для решения задач обеспечения качества обслуживания в телекоммуникационных сетях различного назначения.

Методы исследования. В процессе решения поставленных задач, в данной работе были использованы методы: теории массового обслуживания; теории телетрафика; теории вероятностей; тензорного анализа сетей; нелинейного программирования; имитационного моделирования.

Научной новизной диссертационной работы являются методы формирования инвариантных моделей распределения трафика и процессов обработки информационных потоков в телекоммуникационных сетях и специальное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, необходимое для формирования инвариантных относительно масштаба моделей распределения информационных потоков в телекоммуникационных сетях с учетом процессно-структурного взаимодействия для оценки вероятностно-временных характеристик исследуемых систем, как характеристик качества обслуживания.

Основными элементами научной новизны являются:

1. впервые предложена обобщенная структура инвариантной модели телекоммуникационных систем, отличающаяся разделением входящего, исходящего и внутреннего трафика;
2. впервые разработан обобщенный алгоритм применения инвариантного моделирования к задаче оценки характеристик качества обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, отличающийся принципом формирования структуры модели, использованием декомпозиционной сети, наличием вспомогательной системы координат;
3. предложена модификация контурного метода тензорного анализа сетей, основанного на инварианте среднего числа требований в системе, для оценки характеристик качества обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, заключающаяся в использовании вспомогательной системы координат и установлении функциональной зависимости от загрузки тензоров качественных показателей;
4. разработан алгоритм формирования контурной инвариантной модели, основанный на инварианте среднего числа требований, отличающийся

применением модифицированного контурного метода тензорного анализа сетей, основанного на инварианте среднего числа требований в системе, и представлена его программная реализация;

5. разработан контурный метод оценки качественных показателей телекоммуникационных сетей, основанный на инварианте загрузки систем, отличающийся: использованием тензоров длительностей обслуживания, интенсивностей поступления и загрузки; способом формирования контурной структуры модели; применением вспомогательной системы координат; способом выбора базисных переменных; введением мнимых систем;
6. доказана теорема о неединственности решения для контурных инвариантных моделей при количестве контуров меньше числа систем;
7. разработан алгоритм создания контурной инвариантной модели, основанный на инварианте загрузки систем, для оценки характеристик качества обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, отличающийся способом формирования структуры модели, использованием тензоров длительностей обслуживания, интенсивностей поступления и загрузки, и представлена программная реализация данного алгоритма;
8. предложен узловой метод, основанный на инварианте загрузки систем, для оценки характеристик качества обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, отличающийся: использованием тензоров интенсивностей обслуживания, интенсивностей поступления и загрузки; выбором исходных данных; способом формирования узловой структуры модели; применением вспомогательной системы координат; способом выбора базисных переменных; введением узловых загрузок и мнимых систем;
9. разработан алгоритм создания узловой инвариантной модели для оценки качественных характеристик телекоммуникационных сетей, основанный на инварианте загрузки систем, отличающийся: способом формирования структуры модели с введением узловых загрузок и мнимых систем; использованием тензоров интенсивностей обслуживания, интенсивностей поступления и загрузки; и представлено программное обеспечение, реализующее данный алгоритм;
10. предложена узловая инвариантная модель с учетом потерь при обслуживании информационных потоков в телекоммуникационных сетях, отличающаяся использованием недиагональных элементов тензора интенсивностей обслуживания.

При разработке методов определения вероятностно-временных характеристик телекоммуникационные сети и системы представлены, как сети и системы массового обслуживания с учетом различных параметров поступающего потока и алгоритмов функционирования данного типа сетей и систем.

Практическая ценность.

Применение предложенного метода определения вероятностно-временных характеристик систем обработки информации позволит оценить качественные показатели телекоммуникационных сетей и систем при обслуживании информационных потоков, что позволит обеспечить заданное качество обслуживания в данных сетях и системах.

Результаты разработки программного обеспечения для формирования модифицированной контурной модели, инвариантной относительно среднего числа требований в системе, получены в результате выполнения работ по Гранту Президента РФ по поддержке молодых ученых МК-1232.2005.9 «Разработка программного комплекса для анализа и синтеза информационных сетей». Также, в результате работ по Гранту Президента РФ по поддержке молодых ученых МК-2070.2008.9 «Исследование качественных показателей обработки информационных потоков в IP сетях с применением тензорной методологии» разработано программное обеспечение для формирования узловой модели телекоммуникационной сети.

Результаты работы использованы при разработке спутниковых систем обработки информации в ОАО «ИСС», что подтверждается актом внедрения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается результатами имитационного моделирования и апробации предложенных методов и алгоритмов.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы докладывались на всероссийских и международных научных конференциях: МНТК "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий" (г. Сочи, 2003); ВНПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД (г. Санкт-Петербург, 2005, 2007, 2009, 2011); ВНТК "Современные проблемы радиоэлектроники" (г. Красноярск, 2003, 2005-2013); ВНТК "Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий" (г. Улан-Удэ, 2005, 2007, 2009); МНК "Системный анализ и информационные технологии", (г. Переславль-Залесский, 2005); IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (Tomsk, 2005, 2009); МНТК "Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий" (г. Сочи, 2005); МНТК "Информационно-вычислительные технологии и их приложения" (г. Пенза, 2005, 2008-2011); МНТК "Современные проблемы информатизации в информационных системах и телекоммуникациях" (г. Воронеж, 2006); МНК «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'06 (г. Москва, 2006); МНТК "Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий" (г. Сочи, 2006-2010); МНК "Интеллектуальные системы и телекоммуникационные науки" (г. Москва, 2006); МНК "Информационные системы и технологии (IST'2006)" (г. Минск, 2006); МНТК "Современные проблемы информатизации в проектировании и телекоммуникациях" (г. Воронеж, 2007); МНТК "Кибернетика и высокие технологии XXI века" (г. Воронеж, 2007); МНК "Системный анализ и

информационные технологии", (г. Обнинск, 2007); ВНИК (с международным участием) "Современные информационные технологии в науке, образовании и практике" (г. Оренбург, 2007-2009); МНК "Проблемы функционирования информационных сетей (г. Новосибирск, 2008); ВНИК (с международным участием) "Технологии информатизации профессиональной деятельности (в науке, образовании и промышленности)" (г. Ижевск, 2008, 2011); МНТК "Современные информационные технологии" (г. Пенза, 2008-2009); МНК "Математическая теория систем" (г. Москва, 2009); ВНИК с международным участием "Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе" (г. Йошкар-Ола, 2009, 2011); МНК "Системный анализ и информационные технологии", (г. Звенигород, 2009); МНТК "Телекоммуникационные науки и технологии" (г. Белгород, 2009, 2011); ВНИК с международным участием "Информационные технологии и математическое моделирование" (г. Томск, 2009); МНПК "XXXIX Неделя науки СПбГПУ", (г. Санкт - Петербург, 2010); МНПК "Измерение, контроль, информатизация" (г. Барнаул, 2011); ВНИК "Современная научная мысль: проблемы и перспективы развития" (г. Чебоксары, 2011); МНПК "Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий" (г. Сочи, 2011); IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (Saint-Petersburg, 2012); МНПК "Инновационные информационные технологии" (г. Прага, 2013); МНК "Системный анализ и информационные технологии", (г. Красноярск, 2013); МНТК "Проблемы техники и технологий телекоммуникаций" (Самара, 2013); Mezinárodní vědecko - praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd» (Praha, 2014); Международна научна практична конференция «Найновите постижения на европейската наука» (София, 2014); ВНИК «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2015, 2016).

Публикации: Результаты диссертации опубликованы в 94 работах, в числе которых 84 статьи (из них 12 в журналах, входящих в перечень ВАК, и 3 в зарубежных изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus), 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация соответствует пунктам 12 и 14 паспорта специальности 05.12.13.

Личный вклад. Все результаты, составляющие содержание данной работы, получены автором самостоятельно.

В статьях, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль в постановке задач и разработке методов их решения.

Наиболее существенные положения, выдвигаемые для защиты:

1. Обобщенная инвариантная модель системы обслуживания информационных потоков в телекоммуникационной сети, которая позволяет обеспечить моделирование процессов разделения входящего и исходящего трафика и реализовать возможность учета функциональной роли элементов при обработке информации.
2. Обобщенный алгоритм применения инвариантных моделей к оценке характеристик качества обслуживания информационных потоков в

телекоммуникационных сетях, который позволяет решать общие задачи формирования инвариантных моделей путем применения преобразования координат геометрического представления исходной, вспомогательной и примитивной сетей независимо от вида используемого инварианта.

3. Модифицированная контурная инвариантная модель телекоммуникационной сети, использующая инвариант среднего числа требований, находящихся в системе, которая позволяет реализовать возможности по оценке среднего числа требований в телекоммуникационной сети, используя в качестве исходных данных значения загрузок систем.
4. Алгоритмическое и программное обеспечение для формирования модифицированной контурной модели, инвариантной относительно среднего числа требований в системе, которое позволяет произвести оценку качественных показателей телекоммуникационной сети для заданных топологий сети и дисциплин обслуживания систем распределения информации.
5. Контурная инвариантная модель телекоммуникационной сети, основанная на инварианте загрузки систем, которая позволяет провести оценку качественных характеристик исследуемой сети при использовании в качестве исходных данных интенсивностей поступления и предварительных загрузок систем.
6. Алгоритмическое и программное обеспечение для формирования контурной инвариантной модели телекоммуникационной сети, использующее в качестве инварианта загрузку систем, и которое позволяет производить анализ вероятностно-временных характеристик данной сети.
7. Контурная инвариантная модель спутниковой сети обработки информации, которая позволяет произвести оценку временных характеристик исследуемой сети.
8. Контурная инвариантная модель телекоммуникационной сети, которая позволяет производить учет свойства самоподобия поступающего трафика.
9. Узловая модель телекоммуникационной сети, основанная на использовании инварианта загрузки систем, которая позволяет производить оценку вероятностно-временных характеристик данной сети.
10. Алгоритмическое и программное обеспечение для формирования узловой модели телекоммуникационной сети, использующее в качестве инварианта загрузку систем и которое позволяет анализировать вероятностно-временные характеристики данной сети.
11. Узловая инвариантная модель спутниковой сети обработки информации, которая позволяет производить оценку временных характеристик исследуемой сети.
12. Узловая инвариантная модель сети обработки мультимедийных потоков, которая позволяет производить анализ вероятностно-временных характеристик сетей данного типа.
13. Модифицированная узловая модель телекоммуникационной сети, основанная на использовании инварианта загрузки систем и которая

позволяет учитывать потери, возникающие при обслуживании информационных потоков.

14. Алгоритмическое и программное обеспечение, обеспечивающее формирование модифицированной узловой модели телекоммуникационной сети, основанной на использовании инварианта загрузки систем, которое позволяет производить оценку вероятности потерь, возникающих при обслуживании информационных потоков.
15. Оптимизационные инвариантные модели распределения трафика в телекоммуникационных сетях, которые обеспечивают минимальное время задержки сети при обслуживании информационных потоков.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения на 324 стр. машинописного текста. Работа содержит библиографию, включающую 174 наименования.

Краткое содержание работы.

Основная часть диссертационной работы состоит из введения, пяти глав и заключения.

Введение содержит общую характеристику работы.

Первая глава посвящена объекту исследования, т.е. собственно телекоммуникационным сетям, основным технологиям построения данных сетей и современному состоянию вопроса исследования характеристик телекоммуникационных сетей. С этой целью проведена классификация телекоммуникационных сетей по нескольким признакам, приведена обобщенная структура телекоммуникационной сети с определением роли отдельных сетевых элементов, сделан обзор характеристик необходимых для оценки исследуемых сетей, рассмотрены основные технологии, используемые в настоящее время для построения данного типа сетей.

Основная часть первой главы посвящена обзору методов оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей. В качестве основных методов рассмотрены следующие направления: теория массового обслуживания, network calculus, тензорный анализ сетей.

Для оценки работы телекоммуникационных сетей используются вероятностно-временные характеристики, такие, как: вероятность искажения пакета, вероятность потери пакета, время отклика сети, односторонняя и двухсторонняя задержка, вариация временных характеристик и др. Анализ именно таких характеристик связан, прежде всего, с особенностями передачи данных с использованием коммутации пакетов в современных телекоммуникационных сетях. Кроме вероятностно-временных характеристик также могут оцениваться скоростные параметры и доступность сети.

При использовании методов сетей массового обслуживания для анализа телекоммуникационных сетей одно из основных сложностей является вычисление нормирующей константы, как с точки зрения математического описания, так и вычислительных затрат. При этом для оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей основной моделью

отдельного узла является идеальная модель вида $M/M/1$, что не позволяет адекватно отражать поведение реальных систем и устройств. Более того, математический аппарат сетей массового обслуживания не позволяет ввести наличие потерь, происходящих в результате накопления пакетов в буфере или работы алгоритмов предотвращения перегрузок. Также следует отметить следующие недостатки, присущие методам теории массового обслуживания: данные модели не позволяют оценить задержки на всех этапах обслуживания пакетов в системах телекоммуникационных сетей (коммутаторах, маршрутизаторах), что снижает адекватность применяемых моделей; устройства сети передачи данных рассматриваются, как одна система массового обслуживания, что не позволяет учесть загрузку отдельных интерфейсов, дуплексный режим передачи данных и распределение трафика; процессы обслуживания рассматриваются без учета топологии сети и маршрутов передачи, хотя и отмечается зависимость вероятностно-временных характеристик сети от ее структуры; при динамическом изменении топологии сети или интенсивностей потоков методы теории массового обслуживания оказываются слишком сложными для их реализации во временных масштабах (миллисекунды и меньше) современных технологий передачи данных.

Стоит отметить, что новые методы оценки характеристик сетей передачи данных, например, такие как *network calculus*, аналогично теории сетей массового обслуживания не учитывают структурную составляющую обслуживания пакетов в телекоммуникационных сетях.

Исходя из анализа методов оценки характеристик телекоммуникационных сетей сделан вывод о том, что наиболее перспективным методом анализа телекоммуникационных сетей можно считать тензорный подход, как учитывающий структурно-процессное взаимодействие при передаче данных в рассматриваемых сетях.

Однако, существующие тензорные модели сетей базируются на инвариантном уравнении в виде формулы Литтла, в связи с чем возникают сложности при реализации таких методов на практике, так как в теории массового обслуживания среднее время задержки выражается через среднее число требований, что приводит к невозможности получения аналитического выражений для оценки вероятностно-временных характеристик систем сети. Более того, в существующих тензорных моделях сохраняется недостаток, присущий теории сетей массового обслуживания, когда каждый узел телекоммуникационной сети представлен в виде одной, обычно одноканальной, системы с бесконечным буфером, что приводит к неадекватному отражению свойств реальных объектов. Кроме того, при использовании тензорного подхода и использовании моделей узлов сети без разделения на отдельные интерфейсы приводит, при некоторых исходных данных, к неадекватному распределению трафика.

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что на сегодняшний день, нерешенной является научная проблема анализа вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей с учетом процессов в ней происходящих и ее топологии. Решение данной проблемы позволит получить

оценку эффективности работы сети в целом и повысить ее производительность. В качестве базового метода решения данной проблемы предлагается использовать тензорный анализ сетей.

Во второй главе рассмотрены основные положения по использованию инвариантного моделирования 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, 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. 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. При анализе телекоммуникационных сетей в данной работе используются закон Литтла для среднего числа требований в системе, выражение для определения загрузки системы и др.

Вторая 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 вероятностно-временных характеристик 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.

Геометрический смысл представленной в данной работе методологии заключается в следующем. Определение значений исследуемых характеристик или параметров (для инфокоммуникаций можно определить эти характеристик, как следующие показатели: среднее число требований, среднее время задержки, загрузка узлов или каналов, интенсивность поступления требований, пропускная способность и т.д.) можно проводить, используя

геометрически инвариантное представление данных характеристик в той системе координат, где их определение будет более простым.

Характеристики телекоммуникационных сетей рассматриваются с позиции приложения тензорного анализа сетей. Определены две группы характеристик исследуемых сетей. Это потоковые, связанные с потоком поступления пакетов, которые относятся к продольным величинам, измеряемым в одной точке; и системные, отнесенные к поперечным величинам. К первым относятся 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 . Ко вторым: загрузка ρ , среднее число требований в системе $\bar{N}$, интенсивность поступающей нагрузки в Эрл u .

В качестве параметров систем рассматриваются следующие величины: средняя длительность обслуживания $\bar{x}$, интенсивность обслуживания μ , среднее время задержки пакета в системе $\bar{T}$, пропускная способность системы B .

Потоковые и системные характеристики связаны через параметры системы. Загрузка системы определяется, как: $\rho = \lambda \bar{x}$. Среднее число требований в системе находится по закону Литтла: $\bar{N} = \lambda \bar{T}$. 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. При этом для каждого из вышеприведенных выражений можно определить и обратные формулы, которые можно использовать в узловом методе тензорного анализа телекоммуникационных сетей: $\lambda = \mu \rho$, $\lambda = f \bar{N}$, $\lambda = \mu u$, $b = B \rho$.

В работе сделан вывод о том, что в зависимости от уровня модели взаимодействия открытых систем одной и той же телекоммуникационной сети может быть сопоставлено несколько разных моделей. На физическом уровне устройства и системы связаны друг с другом посредством физических соединений. Рассматривая данный уровень взаимодействия узлов, любое устройство сети можно представить в виде сети массового обслуживания, каждая система которой будет моделировать отдельный физический интерфейс устройства передачи информации. Рассматриваемый интерфейс можно представить в виде одноканальной системы распределения информации с условными или комбинированными потерями. На канальном уровне и выше, соединения являются логическими и необходимо рассматривать уже не только физические соединения, существующие между узлами, а учитывать направления передачи к узлам сети. Каждое направление будет задано системой, тип которой определяется дисциплиной обслуживания реальной системы обработки информационных потоков. Следует отметить, что основные зависимости исследуемых показателей являются функциями от загрузки: $p_{\text{потерь}} = f(\rho)$ и $T_{\text{задержки}} = f(\rho)$.

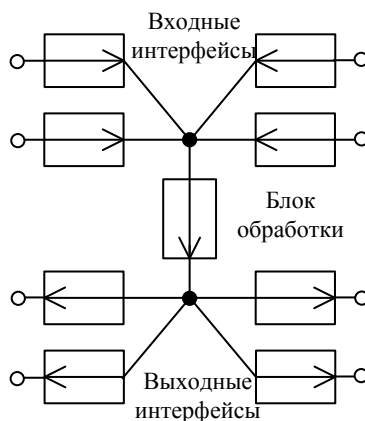


Рисунок 1. Базовый блок

В качестве основы инвариантной модели телекоммуникационной сети в работе предложено использовать базовый блок (рис. 1), в состав которого входят системы, моделирующие входящие и исходящие интерфейсы, как физические, так и логические; и блок обработки, который является моделью основного обслуживающего устройства: для коммутатора это коммутационный элемент, для IP-маршрутизатора это многоэтапное обслуживание и т.д. В модели телекоммуникационной сети данные системы, рассматриваются, как ветви, обладающие направлением и ограниченные узлами.

Для вышеприведенных соотношений определены формулы преобразований для потоковых характеристик телекоммуникационных сетей, рассматриваемые в контексте тензорного анализа, как контравариантные: $\lambda^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} \lambda^{\alpha}$, $c^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} c^{\alpha}$, $b^{\alpha'} = C_{\alpha}^{\alpha'} b^{\alpha}$. Данные формулы используются для контурного метода тензорного анализа сетей. 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 телекоммуникационным сетям от методов анализа электрических цепей.

Для узлового метода инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей определены формулы преобразований для системных характеристик телекоммуникационных сетей, рассматриваемые в контексте тензорного анализа, как ковариантные, например: $\rho_{\alpha'} = A_{\alpha}^{\alpha'} \rho_{\alpha}$. Тензор преобразования $A_{\alpha}^{\alpha'}$ описывает структуру связей в модели телекоммуникационной сети.

С целью применения предложенной методологии для рассматриваемых моделей телекоммуникационных сетей определен примитивный элемент сети в виде отдельной, т.е. несвязанной системы массового обслуживания. Таким образом, определена базовая сеть, состоящая из несвязанных примитивных элементов, в терминах тензорного анализа сетей являющаяся примитивной. Примитивная сеть может быть представлена, как состоящая из несвязанных примитивных элементов (рис. 2).

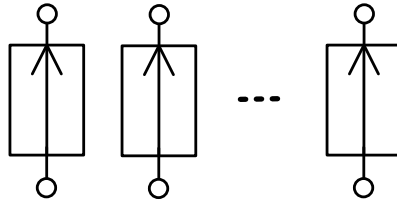


Рисунок 2. Примитивная сеть

Тогда, используя элементы примитивной сети и структуру базового блока телекоммуникационные сети можно представить в виде набора систем распределения информации. В качестве примера представлена сеть из двух маршрутизаторов (рис. 3).

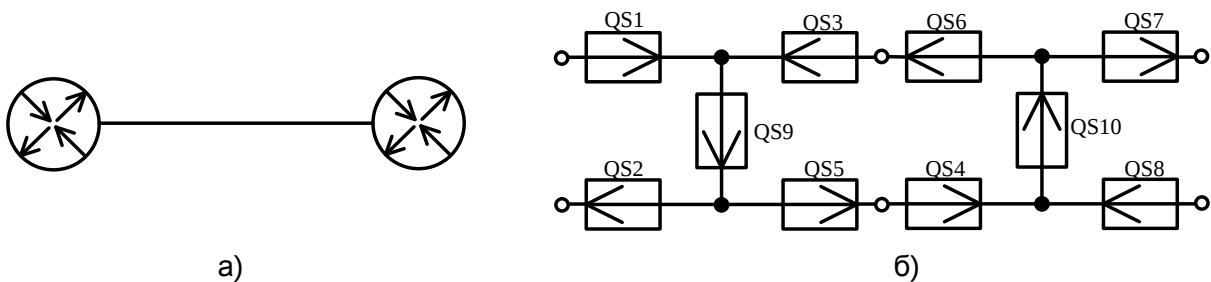


Рисунок 3. Сеть из двух маршрутизаторов (а) и ее модель (б)

Для решения задач формирования инвариантных моделей телекоммуникационных сетей во второй главе проведен анализ топологий исследуемых телекоммуникационных сетей, в результате которого выявлены особенности формирования моделей данных сетей. Основные модели данных сетей могут быть представлены в контурном или узловом виде, соответствующие контурному и узловому методам тензорного анализа сетей.

Исходя из выбранного представления модели телекоммуникационной сети, методы тензорного анализа сетей требуют задания соответствующих воздействующих величин. В работе определено, что контурный метод основан на том, что интенсивности потоков в ветвях λ (ветвь это отдельный элемент или последовательно включенные системы) вызывают, например, загрузку (нагрузку, очередь и т.д.) систем. В узловом методе загрузки систем вызывают в качестве отклика интенсивности потоков в связи с чем сделан вывод о том, что использование узлового метода более предпочтительно при анализе телекоммуникационных сетей.

В заключительной части главы, в соответствии с основными разработанными положениями инвариантного моделирования, представлен алгоритм применения тензорного анализа телекоммуникационных сетей, позволяющий обеспечить оценку вероятностно-временных характеристик исследуемых сетей и систем.

В третьей главе рассматривается формирование инвариантных моделей и программное обеспечение для исследования вероятностно-временных характеристик сетей основанное на инвариантном уравнении, описывающем

поведение простейшего элемента в виде закона Литтла, связывающего среднее число требований и среднее время задержки через интенсивность поступления требований.

Для анализа модели телекоммуникационной сети, описываемой данным уравнением поведения, выбран контурный метод тензорного анализа сетей, что связано с использованием в качестве базисных переменных интенсивностей трафика. Контурные интенсивности обеспечивают учет структуры сети при объединении отдельных систем в единую сеть.

Для контурного метода определен вид примитивной контурной сети и тензорное уравнение для описания ее поведения в виде: $N_\alpha = T_{\alpha\alpha} \lambda^\alpha$. N_α – ковариантный тензор среднего числа требований, находящихся в системах; $T_{\alpha\alpha}$ – дважды ковариантный тензор среднего времени нахождения требований в системах; λ^α – контравариантный тензор поступления требований. Определен вид соответствующего матричного уравнения.

Для рассматриваемого метода установлено, что контурное представление модели телекоммуникационной сети является вспомогательной сетью, для описания поведения которой используется тензорное уравнение: $N_{\alpha'\alpha'} = T_{\alpha'\alpha'} \lambda^{\alpha'}$, где $\bar{N}_{\alpha'\alpha'}$ – среднее число требований в системах вспомогательной сети, $\bar{T}_{\alpha'\alpha'}$ – среднее время задержки требований в системах вспомогательной сети, $\lambda^{\alpha'}$ – интенсивности поступления требований в системы вспомогательной сети (контурные интенсивности, базис геометрического описания вспомогательной сети).

При этом взаимосвязь систем друг с другом в сети описывается тензором преобразования интенсивностей потоков C_α^α , определяемым из соотношения: $\lambda^\alpha = C_\alpha^\alpha \lambda^{\alpha'}$, где λ^α – тензор интенсивностей поступления вызовов для примитивной сети; $\lambda^{\alpha'}$ – тензор контурных интенсивностей поступления вызовов во вспомогательной сети. Элементы i -ой строки C_α^α показывают контурные потоки, проходящие через i -ую систему распределения информации, элементы j -го столбца содержат информацию о системах, входящих в j -ый контур.

В таком случае, правила преобразования составляющих тензорного уравнения поведения сети приобретают следующий вид: для среднего числа требований: $N_{\alpha'} = (C_{\alpha'}^\alpha)_t N_\alpha$; для средней длительности обслуживания: $T_{\alpha'\alpha'} = (C_{\alpha'}^\alpha)_t T_{\alpha\alpha} C_{\alpha'}^\alpha$.

В дальнейшем произведена модификация контурного метода проф. Петрова М.Н. с целью устранения сложностей, возникающих при практическом применении метода, и введены следующие составляющие уравнения поведения сети: $W_{\alpha\alpha}$ – тензор, элементы которого являются функциональными зависимостями среднего времени задержки от загрузки для заданной дисциплины обслуживания (типа системы массового обслуживания) и заданного значения загрузки; Q_α – тензор, элементы которого являются

функциональными зависимостями среднего числа требований от загрузки для заданной дисциплины обслуживания (типа системы массового обслуживания) и заданного значения загрузки.

Для предложенной модификации контурного метода установлены правила преобразования для модифицированного уравнения состояния, как: $W_{\alpha'\alpha'} = (C_{\alpha'}^\alpha)_t W_{\alpha\alpha} C_{\alpha'}^\alpha$; $Q_{\alpha'} = (C_{\alpha'}^\alpha)_t Q_\alpha$. Тогда, уравнение поведения сети примет вид: $(C_{\alpha'}^\alpha)_t W_{\alpha\alpha} C_{\alpha'}^\alpha \lambda^{\alpha'} = (C_{\alpha'}^\alpha)_t Q_\alpha$. Следовательно, для рассматриваемой инвариантной модели распределение трафика в исходной сети (модели телекоммуникационной сети) находится, как: $\omega^\alpha = C_\alpha^\alpha \lambda^{\alpha'}$. Полученный результат используется в дальнейшем для нахождения вероятностно-временных характеристик, как отдельных систем, так и всей сети в целом. При использовании в качестве моделей систем $M/M/1$, среднее время задержки для всей сети в целом может быть определено, как: $\bar{T} = \sum_i \frac{1}{\mu_i - \omega_i}$. Однако, могут

быть использованы и другие дисциплины обслуживания.

Для предложенного метода определена последовательность этапов анализа телекоммуникационной сети и разработан алгоритм анализа вероятностно-временных характеристики телекоммуникационной сети, что в дальнейшем было реализовано в виде программного обеспечения. Сравнение полученных при расчете разработанным программным комплексом результатов с результатами имитационного моделирования в среде GPSS показало, что расчет характеристик в разработанной программе проходит намного быстрее, чем в GPSS, при этом возможности в задании для анализа схем сетей намного шире и проще, чем в GPSS.

По результатам данной главы сделан вывод о том, что обычные методы расчета более эффективны для сетей малого масштаба, но при анализе больших сетей использование тензорной методологии более предпочтительно. Если же размерность матриц получается очень большой, то избавиться от громоздкости можно путем использования методов диакоптики. Также, отмечается, что сложность применения данного метода заключается в необходимости выбора значений загрузки для примитивной сети, так как при объединении систем в сеть возможно получение физически нереализуемого результата, что связано с наличием ограничений на загрузку систем в общем случае.

Четвертая глава посвящена вопросам использования методов инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей с использованием в качестве инвариантного уравнения выражения загрузки систем. В данной главе рассмотрены основные положения контурного метода, определены основные этапы анализа сетей и выявлены особенности применения метода с данным инвариантом. Использование именно данного инвариантного уравнения снимает ограничения для практического применения контурного метода инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей.

Для контурного метода инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей, определены три вида сетей, используемых при моделировании телекоммуникационных сетей.

Первый тип – это исходная сеть, описываемая уравнением состояния $\rho_\alpha = t_{\alpha\alpha} \lambda^\alpha$. Исходная сеть должна быть приведена к контурному виду путем замыкания путей с использованием мнимых ветвей.

Второй вид сети это примитивная сеть, получаемая из исходной путем декомпозиции систем ее составляющих, поэтому количество систем в исходной и примитивной сетях совпадает. Уравнение состояния примитивной сети, записывается, как: $\rho_\beta = t_{\beta\beta} \lambda^\beta$.

Третий вид сети, т.н. вспомогательная, которая обеспечивает учет структуры исходной сети при объединении систем примитивной сети и для телекоммуникационных сетей также содержит информацию о путях передачи трафика. Возбуждение вспомогательной сети производится контурными интенсивностями $\lambda^{\beta'}$, вызывающими в сети отклик в виде загрузок сети $\rho_{\beta'}$.

Уравнение поведения вспомогательной сети записывается, как: $\rho_{\beta'} = t_{\beta'\beta'} \lambda^{\beta'}$.

Во вспомогательной системе координат исходная контурная сеть заменяется контурной сетью, которая формируется при объединении систем, составляющих примитивную сеть.

Введение понятий исходной, примитивной и вспомогательной сетей позволило определить тензор и формулы преобразования. Тензор преобразования $C_{\beta'}^\beta$ это геометрический объект, связывающий переменные примитивной и вспомогательной сети. При приведении исходной сети к контурному виду вводятся мнимые ветви, связанные парами источник-получатель (показано на примере источник 1 – получатель 8 на рис. 4), поэтому тензор преобразования может быть представлен в виде:

$$C_{\beta'}^\beta = \begin{pmatrix} R_{\beta'}^\beta \\ U_{\beta'}^\beta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $R_{\beta'}^\beta$ описывает участие реальных систем в организации путей, $U_{\beta'}^\beta$ описывает участие мнимых ветвей. Правила преобразования определяются исходя из инвариантного соотношения: $\rho_\beta \lambda^\beta = \rho_{\beta'} \lambda^{\beta'}$. Таким образом, правило преобразования интенсивностей потоков записывается, как: $\lambda^\beta = C_{\beta'}^\beta \lambda^{\beta'}$, а правило преобразования для длительностей обслуживания определено в виде: $t_{\beta'\beta'} = (C_{\beta'}^\beta)_t t_{\beta\beta} C_{\beta'}^\beta$.

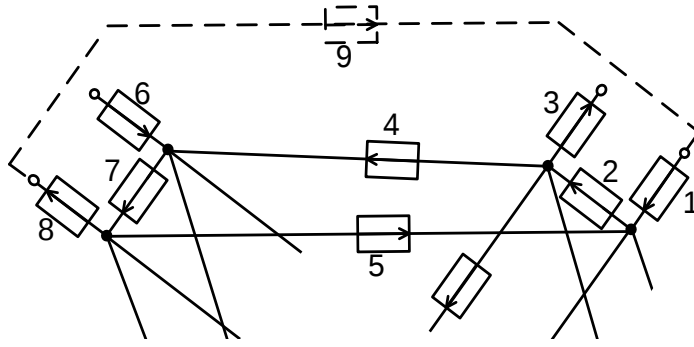


Рисунок 4 Пример формирования замкнутого контура

Для использования предложенного метода определено основное уравнение, позволяющее найти загрузки систем исходной сети, в виде: $(C_{\beta'}^{\beta})_t \rho_{\beta} = (C_{\beta'}^{\beta})_t t_{\beta\beta} C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta'}$. Решение этого уравнения относительно контурных интенсивностей $\lambda^{\beta'}$ обеспечивает нахождение распределения трафика по сети, как: $\lambda^{\alpha} = C_{\beta'}^{\alpha} \lambda^{\beta'}$. Откуда, загрузка для каждой системы может быть найдена, как: $\rho_{\alpha} = t_{\alpha\alpha} \lambda^{\alpha}$.

Для оценки вероятностно-временных характеристик используем известные выражения для нахождения вероятности состояний систем λ_i , среднего числа требований в системе $\bar{N}_i$ и среднее время задержки $\bar{T}_i$, определяемые, как функциональные зависимости от загрузки $[P]_i$, ($i=1..n$) в соответствии с выбранной дисциплиной обслуживания системы распределения информации. Также можно определить среднее время задержки и вероятность потерь на маршруте передачи в телекоммуникационной сети. Таким образом, продемонстрирована возможность применения предложенного метода к задаче определения характеристик телекоммуникационных сетей с целью обеспечения необходимого времени доставки информации и надежности передачи информации. Кроме того, нахождение распределения трафика в сети позволяет найти перегруженные участки и разработать методы перенаправления потоков информации для предотвращения перегрузки. Следовательно, разработанный метод позволит оценить эффективность работы телекоммуникационной сети с целью повышения ее производительности.

На основе представленного метода разработан алгоритм применения контурного метода оценки загрузки систем, использующий правила и тензор преобразования, предложенные в данной главе.

Для демонстрации возможностей предложенного метода представлены примеры использования предложенного метода к задаче определения загрузок систем телекоммуникационной сети из двух взаимодействующих маршрутизаторов, мультисервисной сети с обслуживанием гетерогенных потоков, спутниковой телекоммуникационной сети (рис. 5).

Исследуемая в данной работе спутниковая сеть передачи данных состоит из четырех спутниковых систем (рис. 5а). Основной системой является система 1, обеспечивающая обработку информации от систем 2-4.

Предполагается, что первая система находится на геостационарной орбите, остальные спутники используют средневисотные орбиты.

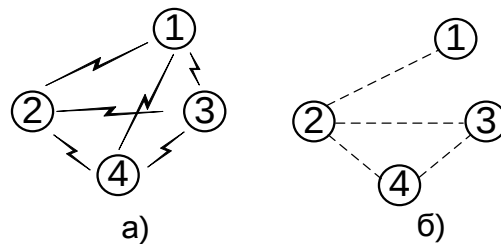


Рисунок 5 Структура исследуемой спутниковой сети

При необходимости, спутниковые системы могут связываться по топологии «каждый с каждым», но в связи с изменяющимися условиями совместного расположения и состояния среды передачи, происходит изменение структуры сети передачи информации. Например, на рис. 5б представлен случай, когда все маршруты передачи информации к первой системе проходят через систему 2. Таким образом, необходимо определить интенсивности потоков в данной сети и распределение трафика с целью определения загрузки систем и времени доставки информации.

Структура модели исследуемой сети с использованием базового блока и замыкания нагрузки через мнимые системы представлена на рис. 6 (мнимая ветвь только для одной пары, все остальные вводятся аналогично).

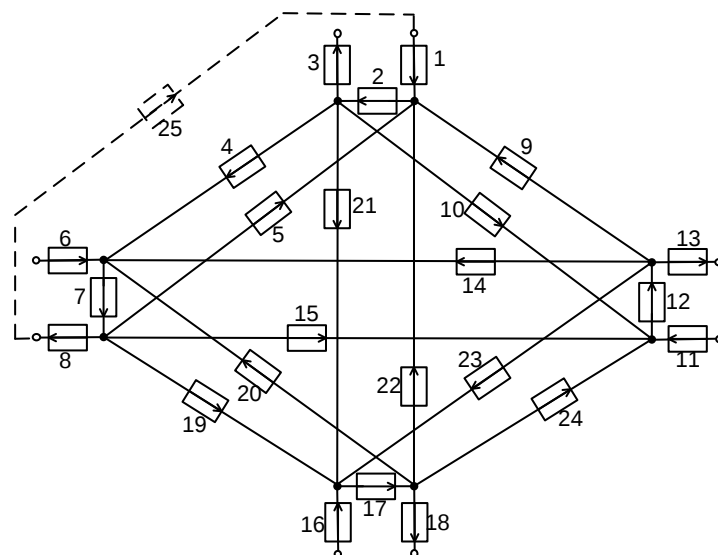


Рисунок 6 Структура модели исследуемой сети.

Тогда, определяя примитивную и вспомогательные сети, получаем тензор перехода в виде (1). Первые три столбца тензора перехода определяются путями от первого спутника ко второму, третьему и четвертому спутникам. Вторые три столбца устанавливаются путями к первому спутнику от второго, третьего и четвертого спутниковых узлов. Ненулевые элементы

строки соответствуют участию ветви с номером равным номеру строки в организации пути передачи информации.

При этом в соответствии с древовидной структурой сети, строки, соответствующие ветвям, не участвующим в организации путей, представлены нулями, так как прямая связь между первым и третьим, четвертым узлами в данной структуре не используется (рис. 5б). Нижняя часть матрицы связана с мнимыми ветвями, участие которых в топологии определяется путями передачи информации.

Для ветвей модели исследуемой сети можно определить вектор $\mathbf{d}$, элементы которого содержат средние временные задержки в ветвях: $\mathbf{d} = [d_i]$, $i = 1..24$, где d_i - среднее время задержки в i -ой ветви.

Использование матрицы перехода в рассматриваемом в предложенном методе виде позволяет произвести расчет временных задержек для каждого маршрута передачи информации в исследуемой сети. Тогда, матрица средних значений временных задержек для каждого пути передачи информации в рассматриваемой сети можно найти, как:

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^T \mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_1 + d_2 + d_4 + d_7 + d_8 \\ d_1 + d_2 + d_4 + d_7 + d_{12} + d_{13} + d_{15} \\ d_1 + d_2 + d_4 + d_7 + d_{17} + d_{18} + d_{19} \\ d_2 + d_3 + d_5 + d_6 + d_7 \\ d_2 + d_3 + d_5 + d_7 + d_{11} + d_{12} + d_{14} \\ d_2 + d_3 + d_5 + d_7 + d_{16} + d_{17} + d_{20} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, процедура нахождения временных задержек на маршрутах передачи информации в телекоммуникационных сетях становится хорошо формализуемой.

В главе также представлены результаты по разработке программного обеспечения, основанного на данном подходе, и продемонстрированы результаты работы этого программного обеспечения. Представленные результаты демонстрируют широкие возможности инвариантного моделирования по исследованию телекоммуникационных сетей, особенно при больших масштабах сетей. Также, следует отметить хорошую формализуемость алгоритма разработанного контурного метода.

В пятой главе рассмотрены основные положения узлового метода инвариантного моделирования при исследовании телекоммуникационных сетей. С точки зрения применения узлового метода на практике, данный метод более предпочтителен по сравнению с контурным. Связано это с использованием в качестве исходных данных интенсивностей обслуживания и поступления потоков. Таким образом, узловой метод имеет реальное практическое применение.

В качестве инвариантного уравнения используется выражение: $\lambda = \mu\rho$, матричный вид которого позволяет описать любую сеть, состоящую из n -элементов. В матричном уравнении состояния: λ_i - интенсивности информационных потоков, ρ_i - загрузки систем распределения информации, μ_i - интенсивность обслуживания. Для обобщения на случай многоканальных систем, под μ_i понимается суммарная интенсивность обслуживания всех приборов.

Аналогично контурному представлению для узлового метода определены виды сетей, необходимых для моделирования телекоммуникационных сетей: исходная, примитивная, вспомогательная для каждой из которых установлены уравнения состояния на основе вышеуказанного инвариантного уравнения.

Для узловой модели телекоммуникационной сети правило преобразования определяется, как взаимосвязь загрузок в примитивной и вспомогательной сетях, которую можно выразить в матричной форме, как: $\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{P}'$ или в тензорной нотации: $\rho_\beta = A_\beta^{\beta'} \rho_{\beta'}$. Используя данное выражение, сформулированы правила преобразования координат исходной сети для получения распределения трафика в исследуемой сети и расчета требуемых вероятностно-временных характеристик. Правило преобразования для вектора интенсивностей потоков сообщений во вспомогательной сети записывается, как:

$$\lambda^{\beta'} = \mu^{\beta'\beta} \rho_\beta. \quad (2)$$

Для тензора интенсивности обслуживания при переходе от примитивной сети к вспомогательной правило преобразования находится, как:

$$\mu^{\beta'\beta} = (A_\beta^{\beta'})_t \mu^{\beta\beta} A_\beta^{\beta'}. \quad (3)$$

Тогда, уравнение состояния вспомогательной сети приобретает вид:

$$(A_\beta^{\beta'})_t \mu^{\beta\beta} A_\beta^{\beta'} \rho_{\beta'} = A_\beta^{\beta'} \lambda^\beta. \quad (4)$$

Решая полученное матричное уравнение относительно $\rho_{\beta'}$, загрузки в исходной сети находятся, как: $\rho_\alpha = A_\alpha^{\beta'} \rho_{\beta'}$. Следовательно, далее нахождение вероятностно-временных характеристик связано с заданием дисциплины обслуживания и использованием формул для среднего времени задержки и вероятностей состояний.

На основе полученных правил преобразования разработан алгоритм применения узлового метода при использовании в качестве инварианта выражения для загрузки систем. Основные этапы данного алгоритма включают в себя: преобразование сети в узловой вид, что связано с разрывом замкнутых путей и введением мнимых ветвей (показано на рис. 7 на примере узла В); формирование векторов интенсивностей и загрузок, тензора

интенсивности обслуживания, определяющих уравнение состояния примитивной сети; определение структуры вспомогательной сети, являющейся проекцией исходной сети в систему координат с базисом определяемым узловыми нагрузками с целью введения топологической информации в уравнение состояния сети, что производится введением узловых нагрузок (рис. 8); формирование уравнения состояния вспомогательной сети и решение данного уравнения с целью получения распределения нагрузок систем; вычисление исследуемых вероятностно-временных характеристик.

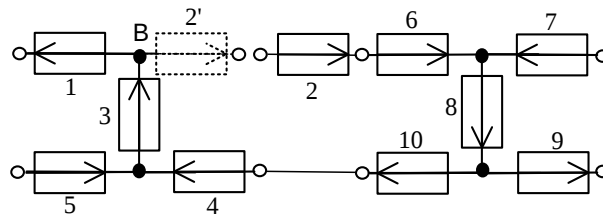


Рисунок 7 Преобразование сети к узловому виду с введением мнимой системы 2'

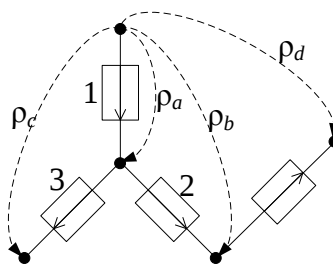


Рисунок 8 Формирование узловых нагрузок.

Результат применения разработанного алгоритма узлового метода к решению задачи определения вероятностно-временных характеристик телекоммуникационной сети продемонстрирован на примере IP-сети (IP Multimedia subsystem). На основе полученных результатов сделан вывод о возможности использования узлового метода для управления качественными показателями телекоммуникационных сетей.

Кроме того, следует отметить, что узловая модель позволяет формализовать процедуры учета потерь (при переполнении буферов) и добавления служебной информации (при перемещении пакетов между уровнями модели взаимодействия открытых систем). В работе показана модификация узлового метода для учета потерь в данной модели телекоммуникационной сети для случая одного полюса. Основной результат такой модификации заключается в том, что использование в узловой модели тензорного анализа сетей ненулевых недиагональных элементов матрицы интенсивностей обслуживания позволяет учесть, как снижение интенсивности потока, связанное с потерями при ограниченности ресурсов, так и увеличение интенсивности потока, связанное с наличием служебной информации при обработке информационных потоков.

Для учета потерь в узловой модели телекоммуникационной сети в общем случае, столбцы матрицы интенсивности обслуживания определяются, как:

$$\mathbf{M}_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu_{jj} \\ \vdots \\ \mu_{jj} p_{loss,j} \prod_i p_i \end{pmatrix},$$

где: μ_{jj} - интенсивность обслуживания в j-ой системе; $p_{loss,j}$ - вероятность потерь в j-ой системе, определяемая, как функция от интенсивности поступления в j-ую систему с учетом потери требований при обслуживании в предыдущих системах; p_i - вероятность поступления требования после обслуживания в i-ую систему, определяется маршрутом передачи требований по сети.

Разработанные алгоритмы (рис. 9) узлового инвариантного моделирования реализованы в программном обеспечении.



Рисунок 9 Укрупненный алгоритм работы программы

При создании программного обеспечения подтвердились выводы о хорошей формализуемости проектных процедур, основанных на инвариантных моделях. Кроме того, в данной реализации предусмотрено определение вероятностно-временных характеристик для отдельных маршрутов передачи информации в телекоммуникационной сети. Следует отметить, что одним из свойств инвариантных узловых моделей является возможность сокращения исходных данных и введения вероятностей распределения трафика, что также было реализовано.

Для оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей с использованием предложенного подхода разработано программное обеспечение, позволяющее оценить характеристики качества обслуживания в телекоммуникационных сетях и продемонстрированы примеры расчетов при использовании данного программного обеспечения. Программная реализация основана на алгоритме, представленном на рис. 10.

На основе разработанной узловой инвариантной модели продемонстрирована возможность использования такого вида моделей для решения задачи оптимизации распределения трафика с целью уменьшения среднего времени задержки, возникающей при обработке и передаче информации в телекоммуникационных сетях, как являющейся ключевой характеристикой, используемой для оценки эффективности работы телекоммуникационных сетей. Используемый математический аппарат при этом позволяет найти временные задержки различного типа с учетом функциональной зависимости временных характеристик от загрузки. Поэтому, инвариантные модели, как позволяющие оценить загрузку систем, обеспечивают возможность по оценке и оптимизации данных характеристик.



Рисунок 10 Базовый алгоритм программной реализации для оценки качественных показателей телекоммуникационных сетей

Под оптимизацией в данном случае подразумевается минимизация временной задержки при заданных интенсивностях поступления и обслуживания. В связи с тем, что зависимость временных характеристик от загрузки являются нелинейной, то предпочтительнее использовать нелинейные методы. В работе в качестве метода оптимизации выбран метод множителей Лагранжа. Функция Лагранжа может быть записана в виде:

$$L = \sum_i d_i + \sum_j l_j g_j, \quad (5)$$

где d_i – задержка в i -ой ветви, l_j – множители Лагранжа, g_j – уравнения системы ограничений. Таким образом, задача минимизации средней задержки в исследуемой сети сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \partial L / \partial \rho_1 = 0 \\ \vdots \\ \partial L / \partial \rho_m = 0 \\ \partial L / \partial k_1 = 0 \\ \vdots \\ \partial L / \partial k_m = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

При этом целевая функция может быть представлена, как: $D(\rho) = \sum_i d_i(\rho_i)$, где ρ_i – загрузка i -ой ветви, определяемая элементами тензора $\rho_{\beta'}$ уравнения (4). Далее, составляем функцию Лагранжа, в соответствии с (5): $L = D(\rho) + \sum_j l_j g_j$, где g_j представляют собой линейную комбинацию элементов тензоров (2) и (3), т.е. уравнение (4) преобразуется к виду: $(A_{\beta'}^{\beta'})_t \mu^{\beta\beta} A_{\beta'}^{\beta'} \rho_{\beta'} - A_{\beta'}^{\beta'} \lambda^{\beta} = 0$. При этом необходимо учитывать, что в правой части уравнения (4) находится распределение трафика по сети, что позволит дополнить набор переменных вектором вероятностей p_j распределения трафика.

Для нахождения минимума задержки находим производные по переменным, соответствующим вероятностям распределения трафика p_j , узловым нагрузкам тензора $\rho_{\beta'}$ и множителям Лагранжа l_j . После нахождения производных, формируем систему уравнений, которую решаем относительно

p_j , $\lambda^{B'}$ и l_j при заданном значении источника нагрузки. Решая полученную систему уравнений относительно вышеуказанных переменных, найдем оптимальное с точки зрения минимума времени задержки распределение трафика. Используя данный подход к решению задачи оптимизации, разработана модель минимизации среднего времени задержки для IP-сети (IP multimedia subsystem), на примере которой показана возможность управления распределением трафика в IP-сетях с целью повышения качества обслуживания.

На основе полученных результатов сделан вывод о том, что узловой метод тензорного анализа сетей с использованием выбранного инварианта повышает практическую привлекательность применения данного подхода к задаче оценки вероятностно-временных характеристик, так как позволяет при небольших вычислительных затратах обеспечить автоматизацию распределения трафика в телекоммуникационных сетях.

Заключение содержит основные результаты работы и выводы по их дальнейшему применению.

Основные результаты и выводы.

Основными результатами работы являются:

1. Проведен анализ характеристик и параметров телекоммуникационных сетей с целью выявления возможностей по их использованию при формировании инвариантных моделей. При этом характеристики телекоммуникационных сетей рассматриваются с позиции приложения тензорного анализа сетей. В результате анализа определены две группы характеристик исследуемых сетей: потоковые, которые относятся к продольным величинам, измеряемым в одной точке, например, среднее число пакетов в единицу времени; и системные, отнесенные к поперечным величинам, такие, как загрузка или среднее число требований в системе. Таким образом определены инвариантные соотношения для моделей телекоммуникационных сетей, рассматриваемые, как уравнения поведения.
С целью применения тензорного анализа сетей к задаче исследования телекоммуникационных сетей сформулированы аксиомы тензорного анализа для моделей телекоммуникационных сетей. Первая аксиома тензорного анализа телекоммуникационных сетей определяет то, что процессы обслуживания информационных потоков в телекоммуникационных сетях, описываемые моделями теории массового обслуживания, в основном определяются дисциплиной обслуживания частной системы. Вторая аксиома тензорного анализа формулируется так: описание телекоммуникационных сетей, содержащих n систем, в разных системах координат содержит одинаковое число матричных переменных и имеет одинаковый вид.
2. В качестве основы структуры обобщенной инвариантной 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: для коммутатора это коммутационный элемент, для IP-маршрутизатора это многоэтапное обслуживание и т.д. В инвариантной модели телекоммуникационной сети данные системы, рассматриваются, как ветви, обладающие направлением и ограниченные узлами.

Для инвариантных моделей телекоммуникационных сетей определен примитивный элемент сети в виде отдельной, т.е. несвязанной системы массового обслуживания. Набор несвязанных примитивных элементов составляет базовую сеть.

Проведен анализ топологий исследуемых телекоммуникационных сетей, в результате которого выявлены особенности формирования моделей данных сетей. Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что инвариантные модели телекоммуникационных сетей могут быть представлены в контурном или узловом виде. Сделан вывод о том, что использование узлового метода более предпочтительно при анализе телекоммуникационных сетей.

3. В соответствии с основными положениями инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей разработан обобщенный алгоритм применения инвариантного моделирования к задаче исследования телекоммуникационных сетей, позволяющий обеспечить оценку вероятностно-временных характеристик исследуемых сетей и систем и обладающий хорошей формализуемостью.
4. Для анализа характеристик телекоммуникационной сети с использованием инвариантной модели, описываемой уравнением поведения в виде закона Литтла, выбран контурный метод тензорного анализа сетей, что связано с использованием в качестве базисных переменных интенсивностей трафика. В дальнейшем произведена модификация данного контурного метода с целью устранения сложностей, возникающих при практическом применении метода.

С целью снятия ограничения для практического применения контурного метода инвариантного моделирования телекоммуникационных сетей разработан метод, использующий в качестве инвариантного уравнения выражение для загрузки систем. Для моделирования телекоммуникационных сетей, с целью использования методов (контурного и узлового) инвариантного моделирования сетей, определены три вида сетей: исходная сеть, описываемая уравнением состояния; примитивная сеть, получаемая из исходной путем декомпозиции систем ее составляющих; вспомогательная сеть, которая обеспечивает учет структуры исходной сети при объединении систем примитивной сети и для телекоммуникационных сетей также содержит информацию о путях передачи трафика. Введение понятий исходной, примитивной и вспомогательной сетей позволило определить тензор и формулы преобразования. Для оценки вероятностно-временных характеристик

используются известные выражения, определяемые, как функциональные зависимости от загрузки в соответствии с выбранной дисциплиной обслуживания системы распределения информации. Определены подходы к нахождению среднего времени задержки и вероятности потерь на маршруте передачи.

5. Разработан обобщенный алгоритм формирования инвариантных моделей телекоммуникационных сетей, позволяющий реализовать методы тензорного анализа сетей в программном обеспечении. На основе обобщенного алгоритма разработаны алгоритмы решения частных задач, такие как: алгоритм анализа вероятностно-временных характеристик телекоммуникационной сети с использованием модифицированного контурного метода оценки среднего числа требований; алгоритм применения контурного метода оценки загрузки систем для оценки качественных показателей телекоммуникационных сетей; алгоритм применения узлового метода к задачам оценки вероятностно-временных характеристики телекоммуникационных сетей при использовании в качестве инварианта выражения для загрузки систем.
6. Разработано программное обеспечение обеспечивающее: формирование модифицированной контурной модели, инвариантной относительно среднего числа требований в системе; формирование контурной инвариантной модели телекоммуникационной сети, использующей в качестве инварианта загрузку систем; формирования узловой модели телекоммуникационной сети; формирование модифицированной узловой модели телекоммуникационной сети, основанной на использовании инварианта загрузки систем. Все разработанное программное обеспечение позволяет производить оценку вероятностно-временных характеристик телекоммуникационной сети, как качественных показателей, для заданных топологий сетей и различных дисциплин обслуживания.
7. Разработанное программное обеспечение для исследования вероятностно-временных характеристик модифицированным контурным методом анализа среднего числа требований использовалось для оценки характеристик качества обслуживания локальной телекоммуникационной сети. Результаты применения программного обеспечения данного метода выявили сложности при использовании частных случаев дисциплин обслуживания, но продемонстрировали высокую гибкость применения рассматриваемого метода при изменении топологии сети. Апробация программного обеспечения для контурного метода оценки загрузки систем проводилась при анализе временных характеристик спутниковой сети обработки информации и вероятностно-временных характеристик телекоммуникационной сети (с учетом самоподобия трафика), в результате чего были сделаны выводы о хорошей формализуемости рассматриваемого подхода, низкой вычислительной сложности алгоритма, высокой гибкости и ограничениях в области исходных данных.

Программное обеспечение, использующее узловой метод оценки загрузки систем (и его модификации), применялось при анализе вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей различного вида (проводные, беспроводные, мультимедийные, спутниковые). В результате апробации разработанного обеспечения были определены необходимые вероятностно-временные характеристики, решены задачи по определению среднего времени задержки и вероятности потерь для каждого маршрута информационного потока, выявлены особенности формирования матрицы перехода, что позволяет сделать вывод о возможности применения данного метода для решения задач оценки вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных сетей. Также, программное обеспечение, использующее узловой метод, использовалось при проверке решений, полученных в результате применения оптимизационной модели к задаче минимизации среднего времени задержки в сетях обработки информации (компьютерной, спутниковой, мультимедийной).

В заключение можно сделать вывод о том, что в связи с тем, что в современных телекоммуникационных сетях необходимо управлять большим количеством устройств и производить обработку множества информационных потоков, решение задачи управления эффективным использованием ресурсов сети значительно усложняется. Предложенный метод анализа сетей, как обладающий возможностями по учету процессно-структурного взаимодействия и гибкости применения, позволяет обеспечить решение такой задачи с небольшими вычислительными затратами, уменьшить задержки при динамическом управлении инфокоммуникационными системами и обеспечить хорошую масштабируемость сети, как при внедрении новых услуг, так и при изменении структуры и технологий телекоммуникационной сети. Кроме того, разработанный метод позволяет достаточно просто формализовать проектные процедуры с целью автоматизации процесса проектирования телекоммуникационных сетей, что позволит повысить качество обслуживания информационных потоков в сетях, в том числе и при обслуживании самоподобных потоков, и обеспечить равномерную загрузку устройств сети и снизить время задержки, создаваемое сетевыми приложениями в транзитных и конечных узлах сети связи.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы. Полученные в работе результаты в дальнейшем могут быть использованы для реализации систем автоматизированного мониторинга состояния телекоммуникационных сетей, систем автоматического управления распределением трафика в данных сетях, в системах обеспечения качества обслуживания информационных потоков. Использование методологии инвариантного моделирования, представленной в данной работе, можно продолжить в направлении разработки мультитензорных моделей телекоммуникационных сетей, что позволит учесть мультимедийные свойства существующих информационных потоков.

Основные публикации по теме диссертации**А) Статьи в российских периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России**

1. Пономарев Д.Ю. Тензорная методология в телекоммуникациях // Системы управления и информационные технологии. – 2006. – 1.1(23). – С. 161-165.
2. Петров М.Н., Пономарев Д.Ю. Об одном методе оценки вероятностно-временных характеристик сетей обработки информации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. – 2007. – 4(17). – С. 28-31.
3. Петров М.Н., Пономарев Д.Ю., Гаипов К.Э., Золотухин В.В. Исследование возможностей применения тензорного метода анализа для управления информационными потоками в сетях на базе стека протоколов TCP/IP // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. – 2008. – 2(19). – С. 65-69.
4. Гаипов К.Э., Красницкий И.Г., Пономарев Д.Ю. Программная система для исследования характеристик сетей обработки информации // Программные продукты и системы. – 2008. – 4(84). – С. 95-98.
5. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. – 2009. – 4. – С. 65-69.
6. Винтураль К.П., Пономарев Д.Ю. Анализ вероятностно-временных характеристик сети по доставке контента // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. – 2009. – 1(22). – С. 64-68.
7. Пономарев Д.Ю. Метод распределения трафика в беспроводных компьютерных сетях // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – 9. – С. 75-79.
8. Пономарев Д.Ю. Тензорная методология в информационных коммуникациях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, 5. – С. 18-23.
9. Ponomarev D. IMS quality of service estimation with tensor concept // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2013. – Т. 6, 4. – С. 462-473.
10. 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).
11. Пономарев Д.Ю. Узловая модель распределения трафика для перспективных спутниковых сетей связи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – 10. – С. 55-58.
12. Пономарев Д.Ю. Оптимизационная модель спутниковой инфокоммуникационной сети // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 4. – С.66-74.

Б) Статьи в зарубежных изданиях, включенных в международные базы цитирования, рекомендованные ВАК Минобрнауки России

13. Ponomarev D.U. Tenzors analysis for investigation next generation network // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2005) – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. – 2005. – P. 53-57.
14. Vintural K.P., Ponomarev D.U. Content Delivery Network Probability-Time Characteristics Analysis // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). – Tomsk : The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2009. – P. 32-36.
15. Ponomarev D. Tensor model of IMS network // IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems 2012, ICUMT'2012. – Pp. 56-62.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Красницкий И.Г., Пономарев Д.Ю. Программно-вычислительный комплекс для анализа вероятностно-временных характеристик сетей интегрального обслуживания. – М. : ВНИИЦ, 2006. – №50200600037.
2. Красницкий И.Г., Пономарев Д.Ю. Анализ пропускной способности информационных сетей. – М: ВНИИЦ, 2006. – №50200601595.
3. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик информационных сетей тензорным методом. – М. : ВНИИЦ, 2006. – №50200602174.
4. Пономарев Д.Ю. Определение распределения интенсивности нагрузки в информационных сетях тензорным методом. – М. : ВНИИЦ, 2006. – №50200602175.
5. Пономарев Д. Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик IP сетей узловым методом тензорного анализа. – ФИПС (Роспатент) : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 25.09.2009. – №2009615358.
6. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик сетей массового обслуживания контурным методом тензорного анализа. – ФИПС (Роспатент) : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 07.10.2010. – №2010616674.
7. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик однополюсных сетей узловым методом тензорного анализа. – ФИПС (Роспатент) : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 31.10.2012. – №2012619825.
8. 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.

Другие публикации

1. Золотухин В.В., Пономарев Д.Ю. Исследование возможностей тензорного метода анализа сетей связи с использованием имитационного моделирования // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ – 2003. – С. 436-440.
2. Пономарев Д.Ю. Тензорный метод исследования мультисервисных сетей // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Улан-Удэ: ВСГТУ – 2005. – С. 53-57.
3. Красницкий И.Г., Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик сетей обработки интегральной информации // Первая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2005: Труды конференции. – М.: Комкнига. – 2005. – Т.2. – С. 175-180.
4. Пономарев Д.Ю. К вопросу тензорного метода анализа информационных сетей // Информационные системы и технологии (IST'2006): третья Международная конференция: материалы – Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь. – 2006. – Ч.1. – С.215-218.
5. Пономарев Д.Ю. Исследование некоторых характеристик сетей массового обслуживания // Материалы IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки». – М: Изд-во механико-математического факультета МГУ. – 2006. – Т.2 – Ч.2 – С.237-239.
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. Тензорный метод и качество обслуживания // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: Материалы научно-практической конференции. – М: МИЭМ. – 2007. – С. 328-331.
8. Пономарев Д.Ю. К вопросу тензорного метода анализа сетей массового обслуживания // Вторая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2007: Труды конференции. – М.: Издательство ЛКИ. – 2007. – Т.2. – С. 227-228.
9. Пономарев Д.Ю. Оценка среднего времени задержки в сетях IP с помощью тензорной методологии // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Технологии информатизации профессиональной деятельности (в науке, образовании и промышленности)» ТИПД-2008. Ижевск: УдГУ. – 2008. – С. 382-389.
10. Пономарев Д.Ю. Узловой метод тензорного анализа сетей для оценки качественных показателей в IP сетях // Современные информационные технологии / Труды Международной научно-технической конференции. – Пенза : Пензенская государственная технологическая академия, 2008. – Т. 8. – С. 67-69.

11. Курюкин Д.В., Пономарев Д.Ю. Тензорный подход к анализу сети MPLS // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2008. – С. 149-152.
12. Пономарев Д.Ю. Оценка качества обслуживания в IP сетях с применением тензорного анализа // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА. – 2008. – С. 230-234.
13. Пономарев Д.Ю. Модель распределения нагрузки в IP сетях // Информационные технологии и математическое моделирование: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск : изд-во Томского университета, 2009. – Т. 1. – С. 198-203.
14. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик узлов IP сети // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: Материалы X Всероссийской научно-технической конференции – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ – 2009. – Ч. 1. – С. 61-65.
15. Пономарев Д.Ю. Исследование показателей качества обслуживания в сети IMS // Компьютерные науки и технологии: сборник трудов первой Международной научно-технической конференции. – Белгород: ГиК, 2009. – Ч.2. – С. 85-89.
16. Пономарев Д.Ю. Программная система для оценки качества обслуживания в сети IMS // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы международной научно-практической конференции. – М: МИЭМ. – 2010. – С. 461-464.
17. Пономарев Д.Ю. Тензорный подход к решению задач оптимизации сетей IMS // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА. – 2010. – С. 66-69.
18. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик качества обслуживания информационных потоков в сети IMS // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник трудов XII Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА. – 2010. – С. 157-160.
19. Пономарев Д.Ю. Распределение трафика в IP сетях с использованием тензорного подхода // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – 4(63). – С. 550-556.
20. Пономарев Д.Ю. Тензорная модель распределения трафика в сети VPN // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИЭМ, 2011. – С. 113-115.
21. Пономарев Д.Ю. Исследование тензорной модели двухфазной системы обработки информации // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник статей XV Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2011. – С. 125-129.

22. Пономарев Д.Ю. Исследование процесса обслуживания очередей в IP-маршрутизаторе // Имитационное моделирование. Теория и практика. / ИММОД-2011: Сборник докладов Пятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – СПб: ОАО «ЦТСС». – 2011. – Т.2. – С. 239-243.
23. Пономарев Д.Ю. Оптимизация временных характеристик сети IMS // Компьютерные науки и технологии: сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции. – Белгород: ГиК, 2011. – С. 500-504.
24. Пономарев Д.Ю. Учет потерь в тензорной модели инфокоммуникационных сетей // Технологии информатизации профессиональной деятельности (в науке, образовании и промышленности) - ТИПД-2011: Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием. – Ижевск: изд-во «Удмуртский университет». – 2011. – С. 352-362.
25. Васильченко Р.С., Пономарев Д.Ю. Исследование времени задержки в пакетных сетях // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2012. – С. 514-517.
26. Пономарев Д.Ю. Программная система для распределения нагрузки информационных систем // NB: Кибернетика и программирование. – 2013. – № 5. – С.29-36.
27. Симаков Д.В., Пономарев Д.Ю. Применение тензорного анализа сетей к задачам предотвращения перегрузок в мультисервисных сетях с целью обеспечения заданного качества обслуживания // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2013. – С. 428-432.
28. Пономарев Д.Ю. Оптимизация сети IMS с использованием тензорного анализа сетей // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. Том 2. – М.:МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С. 349-354.
29. Ponomarev D.Yu. The nodal tensor model for QoS estimation of communications networks [Электронный ресурс] / D.Yu. Ponomarev // Проблемы телекоммуникаций. – 2013. – № 2 (11). – С. 27-32. – Режим доступа к журн.:http://pt.journal.kh.ua/2013/2/1/132_ponomarev_tensor.pdf
30. Пономарев Д.Ю. Оптимизация распределения трафика в сети IMS // XIV Международная научно-техническая конференция "Проблемы техники и технологий телекоммуникаций": материалы конференции. – Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2013. – С. 139-141.
31. Пономарев Д.Ю. Оптимизация среднего времени задержки в сети IMS // Пятая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ – 2013: Труды конференции. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. – Т.2. – С. 388-394.
32. Пономарев Д.Ю. Программная система для распределения нагрузки информационных систем // Информационные технологии в

профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2013. – Ч.1. – С. 109-113.

33. Пономарев Д.Ю. Контурный метод тензорного анализа инфокоммуникационных сетей // Materiály X mezinárodní vědecko - praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd – 2014». Matematika. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o. , 2014. – S. 68-73.
34. Ponomarev D. Mesh method of tensor analysis of infocommunications networks // Nauka i studia. – 2016. – 3. – P. 994-999.
35. Пономарев Д.Ю. Оптимизация среднего времени доставки информации в спутниковой инфокоммуникационной сети // Системы связи и радионавигации. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2016. – С. 59-62.