

На правах рукописи

ГАВЛИЕВСКИЙ
Серго Леонидович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С
НЕСКОЛЬКИМИ КЛАССАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Специальность 05.12.13 -
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГОБУ ВПО ПГУТИ).

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Карташевский В.Г. (ФГОБУ ВПО ПГУТИ)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Докучаев В.А.

доктор технических наук, профессор
Гольдштейн Б.С.

доктор технических наук, профессор
Васин Н.Н.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи (ФГУП ЛОЦНИИС)

Защита состоится «30» марта 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д219.003.02 при Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОБУ ВПО ПГУТИ.

Автореферат разослан «24» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д219.003.02
доктор технических наук, профессор



Д.В. Мишин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задача построения современного информационного общества немыслима без развертывания мощных высокопроизводительных мультисервисных сетей. Именно поэтому все Операторы, входящие в ОАО «Связьинвест», а также Операторы корпоративных и ведомственных сетей поставили в качестве приоритетной задачу построения и реконструкции мультисервисных сетей на базе пакетной коммутации с использованием IP-протокола.

При проектировании такого рода сетей проектировщики столкнулись с очень серьезной проблемой. Если для расчета сетей с коммутацией каналов имеется удобный и проверенный временем математический аппарат, реализованный в виде компьютерных программ на автоматизированном рабочем месте (АРМ) проектировщика, то для сетей с коммутацией пакетов дело обстоит гораздо сложнее. Автоматические телефонные станции (АТС) появились много десятилетий тому назад и их модели хорошо описаны в технической литературе, в то время же такие телекоммуникационные устройства сетей с пакетной коммутацией как маршрутизаторы, серверы, шлюзы и некоторые другие стали широко использоваться относительно недавно. Поэтому модели сетей на их основе недостаточно проработаны, а методы расчета не доведены до практической реализации.

Значительный вклад в решение вопросов, связанных с созданием теоретического и практического задела построения современных мультисервисных сетей, внесли работы отечественных ученых Г.П. Башарина, В.М. Вишневого, В.С. Гладкого, Б.С. Гольдштейна, В.А. Ершова, Г.П. Захарова, В.А. Ивницкого, В.В. Крылова, Н.А. Кузнецова, А.Е. Кучерявого, В.Г. Лазарева, А.Н. Назарова, А.П. Пшеничникова, С.И. Самойленко, К.Е. Самуйлова, Ю.А. Семенова, Н.А. Соколова, С.Н. Степанова, Э.И. Якубайтиса, Г.Г. Яновского и зарубежных специалистов Д. Барбера, Д. Девиса, Л. Клейнрока, Дж. Мартина, Р. Мобли, М.А. Шнепс-Шнеппе, М. Шварца, Фриша и других.

Актуальность темы нашла подтверждение в таких руководящих материалах как:

1. Концептуальные положения по построению мультисервисных сетей на ВСС России. Утверждены Минсвязью РФ 25 января 2002 г;
2. Принципы построения мультисервисных местных сетей электросвязи. Руководящий технический материал. 2005 год;
3. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации. Утверждена Президентом Российской Федерации В.Путиным 7 февраля 2008 г., № Пр-212.

Цель и задачи исследования. Цель и задачи работы заключаются в разработке методов расчета вероятностно-временных характеристик (ВВХ) мультисервисных сетей. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Осуществить рассмотрение сценариев эволюции существующих односервисных сетей и их миграции к мультисервисным с целью формулирования требований к методам анализа современных сетей.
2. Провести анализ архитектур сетей переходного периода, а также сетей связи следующего поколения - Next Generation Network (NGN) и описание их компонентов в терминах теории массового обслуживания (ТМО).
3. Сформулировать системный подход к построению моделей и разработке методов расчета характеристик мультисервисных сетей.
4. Описать потоки на узлах и ветвях сети в условиях статистического равновесия.
5. Описать типовые топологии мультисервисных сетей в терминах теории множеств.
6. Разработать методы расчета характеристик сетей с несколькими классами обслуживания.
7. Выполнить с использованием разработанных программных средств расчеты характеристик сетей и провести системный анализ.

Объектом исследования являются мультисервисные сети с несколькими классами обслуживания.

Предметом исследования являются модели и методы, предназначенные для расчета характеристик качества обслуживания и последующего системного анализа мультисервисных сетей.

Методология исследования. Для решения поставленной задачи используются элементы теории сложных систем, аппарат конечных дискретных цепей Маркова (КДЦМ), теория телетрафика, ТМО, теория графов, элементы теории множеств, матричный аппарат, элементы вычислительной математики.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Процедура расчета элементов матрицы переходных вероятностей (МПВ), описывающей процесс передачи одиночного пакета по сети в виде дискретной марковской цепи с поглощающими состояниями.
2. Соотношения, связывающие для важнейших частных случаев элементы таблиц распределения информации (таблиц коммутации по меткам, маршрутных таблиц, таблиц коммутации) с элементами МПВ.
3. Соотношения, описывающие типовые топологии сетей в терминах теории множеств.
4. Системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), описывающие потоки на ветвях и узлах сети в стационарном режиме и позволяющие рассчитать для каждой категории обслуживания время задержки и вероятности потерь пакетов между каждой парой узлов сети, а также потоки на ветвях и узлах сети, задержки, вероятности блокировок и уровни загрузки каналов.
5. Методы, основанные на решении СНАУ, позволяющие рассчитывать характеристики сети в условиях совместного воздействия различных факторов, в том числе при изменениях:

- нагрузки;
 - структуры тяготения;
 - пропускной способности каналов;
 - при отказе оборудования и обрывах каналов;
 - числа классов обслуживания.
6. Результаты расчетов, позволяющие определить наиболее критические места на сети в условиях совместного воздействия различных факторов, оценить эффект от разделения пакетов на классы обслуживания.

Научная новизна результатов исследования.

1. Разработана процедура расчета элементов МПВ, описывающей процесс передачи пакетов по сети в виде дискретной марковской цепи с поглощающими состояниями.
2. Для важнейших частных случаев получены соотношения, связывающие элементы таблиц распределения информации (таблиц коммутации по меткам, маршрутных таблиц, таблиц коммутации) с элементами МПВ.
3. Разработаны математические модели в форме СНАУ, описывающих потоки на ветвях и узлах сети в стационарном режиме как при использовании одного, так и нескольких классов обслуживания.
4. Разработаны алгоритмы и методы расчета характеристик сетей, основанные на решении СНАУ.
5. Получены соотношения, позволяющие описывать типовые топологии сетей в терминах теории множеств.
6. Получены результаты, позволяющие оценить эффект от разделения пакетов на классы обслуживания, определить каналы сети, склонные к перегрузкам, дать рекомендации по разгрузке наиболее перегруженных каналов, изучить влияние места обрыва канала на характеристики качества обслуживания.

Обоснованность и достоверность основных результатов работы обеспечивается строгим характером использованных методов, адекватностью и корректностью примененного математического аппарата, сопоставлением с аналогичными результатами, полученными другими исследователями. Достоверность положений и выводов работы подтверждается результатами моделирования, практической реализацией и внедрением разработок.

Личный вклад. Все результаты, составляющие содержание данной работы, получены автором самостоятельно, соответствуют пунктам 1 и 2 паспорта специальности 05.12.13. В главе 6 использована программа, разработанная автором лично.

Практическая значимость работы

Использование разработанных методов позволит рассчитать характеристики сети при различном наборе исходных данных, увеличить возможное количество рассматриваемых вариантов и выбрать из них оптимальный на основе строгого научного анализа, улучшить качество проектов за счет комплексного решения, возникающих при проектировании задач, сократить

сроки проектирования за счет его компьютеризации, сократить затраты на проектирование, прежде всего, за счет использования возможностей, предоставляемых вычислительной техникой.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационных исследований по разработке методов расчета характеристик сетей использовали следующие предприятия:

1. ОАО «Гипросвязь» г. Самара – при выполнении ряда проектов по построению мультисервисных сетей;
2. ЗАО «Энвижн Групп» Энвижн-Волга - при принятии проектных решений по заказу «Организация “последних миль” на объектах Приволжского филиала ОАО «Ростелеком»;
3. ООО «ТехноСерв А/С» - при выполнении заказа « Проектирование технической архитектуры Единой системы управления предприятием (ERP) ОАО «ВолгаТелеком» на основе программного продукта Oracle e-Business Suite. Телекоммуникационная подсистема»;
4. Самарский филиал «Ростелеком – Волга» - для расчета характеристик и системного анализа сети передачи данных IP/MPLS;
5. ФГОБУ ВПО ПГУТИ - при внедрении в учебный процесс на кафедре МСИБ

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждены на школе-семинаре «Проблемы и перспективы внедрения мультисервисных сетей на основе современных телекоммуникационных технологий» (Самара, 2002), на школе-семинаре «Развитие мультисервисных сетей в МРК ОАО «Связьинвест» (Самара 2004), на школе-семинаре «Особенности построения сетей электросвязи на основе технологии IP-MPLS» (Самара 2005), на школе-семинаре «Управление и контроль качества услуг в сетях нового поколения» (Самара 2005), на семинаре-совещании «Развитие широкополосного доступа на сетях электросвязи России», на юбилейной научно-практической конференции «35 лет ФАИТ и 90 лет со дня рождения основателя факультета профессора Л.Ф. Куликовского» (Самара 1995), на Всероссийской межвузовской научно-практической конференции «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании» (Самара, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), российских НТК профессорско-преподавательского состава ПГАТИ (Самара 1999, 2000, 2001, 2005), на десятой международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТ и ТТ-2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 65 печатных работ, в том числе 22 статьи, из них 16 - в журналах, входящих в перечень ВАК, кроме того, 1 статья из перечня ВАК будет опубликована в первом квартале 2012 года.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации составляет 353 страницы, в том числе 98 рисунков, 32 таблицы, список литературы из 310 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, ее актуальность, научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе проанализирован процесс эволюции телекоммуникационных сетей региональных Операторов и Провайдеров услуг. Отмечено, что существующие сети являются односервисными и не удовлетворяют требованиям обеспечения пользователей современными телекоммуникационными услугами. Рассмотрены архитектуры мультисервисной сети широкополосного доступа и сети переходного периода. Проанализированы возможности и критерии выбора сетевых технологий, которые целесообразно использовать для построения высокоскоростных транспортных магистралей и подключения конечных пользователей к услугам мультисервисных сетей.

Отмечено, что в переходный период будут широко использованы комбинированные технологии построения сетей доступа, когда часть сети доступа будет построена на базе электрического кабеля, а часть - на основе оптоволокна. При этом в дальнейшем, в ходе модернизации, будет происходить постепенная замена электрического кабеля на оптический с улучшением качества обслуживания подключенных к сети пользователей. Проанализированы перспективные технологии построения транспортной сети с использованием технологий Metro Ethernet, CWDW, DWDW, Multiprotocol Label Switching (MPLS).

Рассмотрены особенности планирования развития мультисервисных сетей в условиях неопределенности исходных данных и жесткой конкуренции со стороны других региональных Операторов. В этих условиях особую актуальность приобретают правильный выбор бизнес стратегии и многовариантный анализ сценариев развития сети, выполненный на основе моделирования (расчетов характеристик) и последующего системного анализа.

Проанализированы возможности существующих методов, которые предлагается использовать для расчета характеристик телекоммуникационных сетей. При этом учтен тот факт, что предшественниками мультисервисных сетей были моносервисные сети, а также распределенные информационно-вычислительные, компьютерные и телекоммуникационные системы и сети. Рассмотрены возможности и ограничения использования для решения поставленной задачи математического аппарата ТМО, теории сетей массового обслуживания, теории телетрафика, тензорного анализа, теории фрактальных процессов. Сформулированы требования к методам анализа мультисервисных сетей с несколькими классами обслуживания.

Во второй главе проанализирована циркуляция потоков в сети ШПД. Рассмотрены модели телекоммуникационных устройств как элементов систем массового обслуживания (СМО). Приведены описания фрагментов сетей как сетей массового обслуживания (СеМО). Рассмотрен переход от схем организации связи к моделям СеМО. Приведено описание типовых топологий транспортных магистралей в терминах теории множеств. На рис. 1 проиллюстрирован принцип формирования потоков в мультисервисной сети. Конечные пользователи подключаются к услугам сети через удаленный доступ

(УД). К одному УД может быть подключено до нескольких десятков конечных пользователей. Это означает, что через порт, соединяющий УД и узел агрегации (УА), направляется суммарный восходящий поток от нескольких десятков терминалов. Несколько УД подключены к УА, которые, в свою очередь, подключены к магистральному узлу (МУ), образующим транспортную сеть.

На каждом уровне происходит суммирование потоков. Причем, если на УД объединяются потоки от нескольких десятков до нескольких сотен источников, на УА от сотен до тысяч, то на МУ поступают потоки уже от тысяч до десятков или даже сотен тысяч источников.

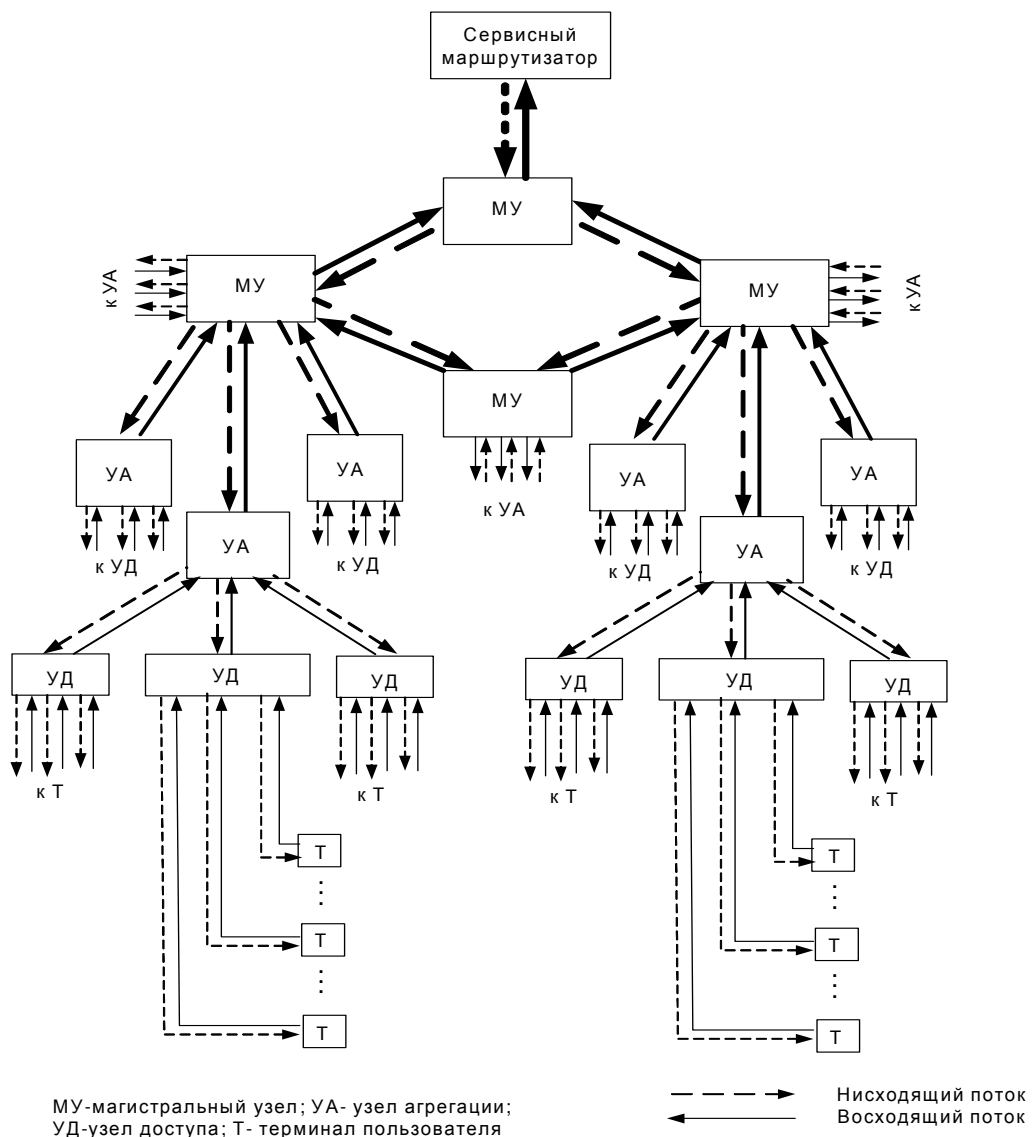


Рис.1. Принцип формирования потоков в мультисервисной сети

Поскольку работа пользователей никак не синхронизирована между собой, то очевидно предположить, что согласно теореме о сложении потоков суммарный поток - восходящий поток – поток в сторону BRAS будет обладать свойствами простейшего потока. Учитывая то, что число сайтов огром-

но, при этом один и тот же пользователь может одновременно работать с несколькими сайтами, аналогичный вывод можно сделать и относительно свойств нисходящего потока.

Рассмотрим теперь участок сети между портом терминала (сервера) и портом УД. Это единственное место на сети, где потоки не суммируются и их можно рассматривать в их первоначальном состоянии. Понятно, что свойства потока на участке Т-УД могут существенно отличаться от свойств потока на участках УД-УА, МУ-МУ, МУ-BRAS (сервисный маршрутизатор). В ряде публикаций утверждается, что трафик на портах серверов обладает свойством самоподобия. Используя принцип декомпозиции, можно рассчитать отдельно характеристики для участка сети, охватывающего УД, УА, МУ, BRAS, на котором поток близок к пуассоновскому и отдельно рассчитать характеристики на участке Т – УД, на котором свойства потока могут отличаться от пуассоновского, например, обладать свойством самоподобия. После чего, можно рассчитать задержки и потери между рассматриваемой парой узлов.

В третьей главе разработан метод расчета характеристик сети, в основе которого лежит использование аппарата КДЦМ. Рассмотрен общий подход к расчету элементов МПВ. Составлена СНАУ, решение которой позволяет определить потоки на ветвях и узлах сети в стационарном режиме и рассчитать основные показатели качества для каждого класса обслуживания. Разработан алгоритм решения системы, основанный на использовании итерационного метода.

Характерной особенностью КДЦМ является то, что по известной МПВ для сети, находящейся в стационарном режиме, используя стандартные матричные операции, работы с ней и матрицами, полученными путем обработки МПВ, можно получить широкий спектр характеристик процесса передачи одиночного пакета относительно искомого узла l . Очевидно, что по сети в каждый момент времени передаются не одиночные пакеты, а достаточно мощные потоки пакетов. Таким образом, для расчета характеристик необходимо знать их распределение по ветвям сети. Учитывая то, по сети передаются достаточно мощные потоки при определении суммарных потоков на ветвях и узлах сети был использован метод полиномиальной аппроксимации, позволяющий осуществлять декомпозицию СеМО на уровне первого момента распределения интервалов времени между пакетами в потоках, циркулирующих в сети.

Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами показана в виде диаграммы на рис. 2, а все формулы и расчетные соотношения приведены в главе 3. Учитывая их громоздкость, зависимость некоторой переменной y от переменной x будем обозначать в дальнейшем как $y = f_y(x)$.

Обозначим через c_{ij} пропускную способность канала, соответствующего ветви (ij) , через τ_{ij} и π_{ij} - задержку при передаче пакета по ветви (ij) и вероятность ее блокировки, через ω_{ij} - число мест ожидания, а через λ_{ij} - поток, поступающий на ветвь (ij) , через ρ_{ij} - уровень загрузки канала (ij) , через

$C = [c_{ij}]_{n_u \times n_u}$, $\tau = [\tau_{ij}]_{n_u \times n_u}$, $\pi = [\pi_{ij}]_{n_u \times n_u}$, $\omega = [\omega_{ij}]_{n_u \times n_u}$, $\lambda = [\lambda_{ij}]_{n_u \times n_u}$, $\rho = [\rho_{ij}]_{n_u \times n_u}$ - соответствующие матрицы (вершины 1- 6), через μ (вершина 7) - интенсивность обслуживания.

Из ТМО известно, что между элементами этих матриц имеют место следующие соотношения: $\rho_{ij} = f_\rho(\lambda_{ij}, c_{ij}, \mu)$; $\tau_{ij} = f_\tau(\lambda_{ij}, c_{ij}, \mu)$; $\pi_{ij} = f_\pi(\lambda_{ij}, c_{ij}, w_{ij}, \mu)$. Из этих выражений следует, что для расчета задержки и блокировки на ветвях сети необходимо знать потоки, поступившие на соответствующие системы буфер канал (СБК). Соответствующие параметры рассчитываются в вершинах 9, 21, 37.

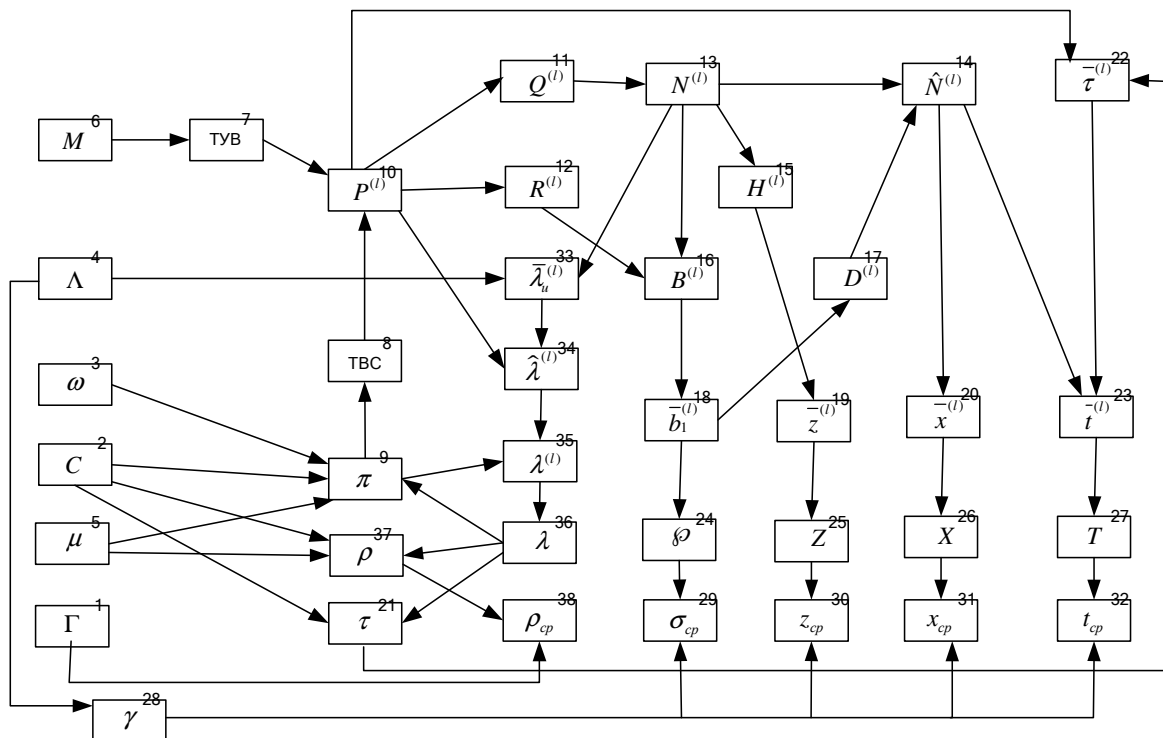


Рис. 2. Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами

Обозначим через:

- $\Lambda = [\Lambda_{kl}]_{n_u \times n_u}$ (вершина 8) матрицу нагрузки. Тогда элемент Λ_{kl} будет равен интенсивности поступления пакетов, которую необходимо передать по сети между рассматриваемой парой узлов k и l . Через $\gamma = [\gamma_{kl}]_{n_u \times n_u}$ (вершина 9) обозначим матрицу тяготения. Она необходима для расчета средне-сетевых показателей. Ее элемент γ_{kl} показывает долю пакетов, которые необходимо передать между узлами k и l в общем потоке передаваемых по сети пакетов.
- $\Gamma_i = \{j_1, \dots, j_v, \dots, j_r\}$ множество узлов соседей i -го узла, тогда топологию сети можно задать в виде множества $\Gamma = \{\Gamma_1, \dots, \Gamma_i, \dots, \Gamma_{n_u}\}$ (вершина 10). Обозна-

чим через r_i ранг i узла. По определению, он будет равен мощности множества Γ_i : $r_i = |\Gamma_i|$.

- $M_i = [m_{ij}^{(i)}]_{r_i \times (n_u - 1)}$ - маршрутную таблицу (МТ) i -го узла. Она представляет собой матрицу, число строк которой равно рангу узла (числу исходящих из узла направлений), а число столбцов - $n_u - 1$, где n_u - число узлов сети. МТ содержит полную информацию, необходимую для выбора исходящего из узла направления. Если для каждого узла i поставлена в соответствие таблица M_i , то говорят, что задан план распределения информации (ПРИ). Запишем его в виде множества МТ: $M = \{M_1, \dots, M_i, \dots, M_{n_u}\}$ (вершина 11).

При принятии решения о выборе исходящего из узла направления для дальнейшей транспортировки пакета учитываются два фактора: состояние этих направлений и МТ данного узла. Введем в рассмотрение вектор состояния узла $\bar{\alpha}$: $\bar{\alpha} = [\alpha_{r_i}, \dots, \alpha_v, \dots, \alpha_1]$, содержащий r_i элементов, которые пронумерованы от 1 до r_i . Каждый элемент вектора может принимать одно из двух значений 0 или 1. Первой компоненте вектора поставим в соответствие состояние ветви (ij_1) , v -компоненте - состояние ветви (ij_v) и соответственно r_i компоненте - состояние ветви (ij_{r_i}) . При этом каждому значению вектора $\bar{\alpha}$ однозначно будет соответствовать α - десятичный код (номер) состояния:

$$\alpha = \sum_{v=1}^{r_i} 2^{v-1} \cdot \alpha_v, \quad (1)$$

что формально может быть записано: $\alpha \leftrightarrow \bar{\alpha} = [\alpha_{r_i}, \dots, \alpha_v, \dots, \alpha_1]$.

Обозначим через $\Omega(\alpha)$ вероятность нахождения узла i в состоянии α . Поскольку в каждый момент времени узел i может находиться только в одном состоянии, то должно выполняться следующее соотношение:

$$\Omega(\alpha) = \prod_{\mu=1}^{r_i} [\alpha_{\mu} \cdot (1 - \pi_{ij_{\mu}}) + (1 - \alpha_{\mu}) \cdot \pi_{ij_{\mu}}]. \quad (2)$$

Последнее выражение позволяет рассчитать вероятность нахождения рассматриваемого узла i в каждом из 2^{r_i} состояний в зависимости от вероятностей блокировок, исходящих из него направлений. Рассчитанные вероятности для удобства будем хранить в таблице вероятностей состояния узла (ТВС) (вершина 12).

Обозначим через $p_{ij_v}^{(i)}(\alpha)$ условную вероятность выбора ветви (ij_v) при нахождении узла i в состоянии α . Заметим, что при возникновении некоторых ситуаций пакеты стираются в узлах. Для учета такого рода потерь введем фиктивный узел 0, имеющий однонаправленную связь от каждого узла сети, т.е. в узел 0 пакет может попасть из любого узла сети, а, оказавшись в нем, прекращает свое дальнейшее продвижение. Обозначим через $p_{i0}^{(i)}(\alpha)$ условную вероятность потерь при нахождении узла в состоянии α .

Условные вероятности выбора исходящих из узла i направлений определяются на основании $\bar{m}_i^{(i)}$. Представим в виде таблицы условные вероятности

сти (ТУВ) (вершина 13) выбора исходящих из i -го узла направлений при условии, что узел находится в том или ином состоянии. Полную вероятность выбора ветви (ij_v) при движении к узлу l можно определить, используя формулу полной вероятности:

$$P_{ij_v}^{(l)} = \sum_{\alpha=0}^{2^q-1} P_{ij_v}^{(l)}(\alpha) \cdot \Omega(\alpha). \quad (3)$$

Для важнейших частных случаев получены выражения, непосредственно связывающие соответствующие элементы МПВ с элементами ТРИ.

Для описания процесса транспортировки по сети одиночного пакета дискретной марковской цепью с поглощающими состояниями поставим в соответствие состояниям цепи узлы сети. Общее число состояний марковской цепи будет равно $n_u + 1$, т.е. на единицу больше числа узлов сети. Это объясняется необходимостью введения дополнительного состояния, соответствующего фиктивному узлу O , при помощи которого можно учесть потери.

Множество состояний марковской цепи, оказавшись в которых процесс передачи пакета прекращается, называются *поглощающими*, остальные получили название *невозвратные*. Таких состояний два, поскольку при передаче пакет покидает сеть в одном из двух случаев: либо когда он достигает искомого узла l , либо когда оказывается дальнейшая передача пакета из узла i в сторону искомого узла l невозможной (неисправность или занятость каналов).

$P^{(l)} = [P_{ij}^{(l)}]_{(n_u+1) \times (n_u+1)}$ - МПВ, описывающая процесс передачи пакета по сети при поиске узла l , (вершина 14) состоит из четырех подматриц $R^{(l)}, O^{(l)}, E^{(l)}, Q^{(l)}$. Подматрица $R^{(l)}$ (вершина 15) содержит вероятности перехода из невозвратных состояний в поглощающие. Подматрица $O^{(l)}$ содержит вероятности перехода из поглощающих состояний в невозвратные. Подматрица $E^{(l)}$ содержит вероятности перехода из поглощающих состояний в поглощающие. Подматрица $Q^{(l)}$ (вершина 15) содержит вероятности перехода из невозвратных состояний в невозвратные.

Обозначим через $I^{(l)}$ единичную матрицу той же размерности, что и $Q^{(l)}$. Матрица $N^{(l)} = (I - Q^{(l)})^{-1}$ (вершина 17) называется *фундаментальной матрицей поглощающей цепи Маркова*. Такое название она имеет потому, что с использованием этой матрицы получают все важнейшие характеристики процесса транспортировки пакета по сети.

Матрица $B^{(l)} = N^{(l)} \cdot R^{(l)}$ (вершина 18) содержит вероятности достижения поглощающих состояний. Вероятность успешной доставки пакетов содержится во втором столбце - \bar{b}_2 (вершина 19).

Модифицированная фундаментальная матрица $\hat{N}^{(l)}$ (вершина 20) рассчитывается следующим образом: $\hat{N}^{(l)} = D^{(l)-1} \cdot N^{(l)} \cdot D^{(l)}$, где $D^{(l)} = [\bar{b}_2^{(l)}]_{dg}$. Матрица $D^{(l)}$ (вершина 21) представляет собой диагональную матрицу, на главной диагонали которой расположены элементы второго столбца матрицы $B^{(l)}$, который обозначен как $\bar{b}_2^{(l)}$.

Обозначим через $\bar{x}^{(l)}$ (вершина 22) вектор длин между узлами сети и искомым узлом l , а через $\bar{\xi}$ - единичный вектор - столбец той же размерности, что и $\bar{N}^{(l)}$, тогда вектор $\bar{x}^{(l)}$ будет равен $\bar{x}^{(l)} = \bar{N}^{(5)} \cdot \bar{\xi}$.

При движении пакета по сети возможно образование циклов, т.е. ситуаций, когда он, прежде чем достигнет искомый l , побывает в некоторых узлах неоднократно. Вероятность образования циклов для пакетов, адресованных узлу l , содержится в матрице $H^{(l)} = [h_{ki}^{(l)}]$ (вершина 23), $h_{ki}^{(l)}$ - элемент, который показывает вероятность попадания в узел i для пакета, передаваемого по сети и из узла l в узел k $H^{(l)} = (N^{(l)} - I) \cdot N_{dg}^{(l)-1}$. Элемент матрицы $h_{kk}^{(l)}$ равен вероятности возвращения пакета в исходный узел k . Рассмотрим вектор $\bar{z}^{(l)}$ (вершина 24), i - тый элемент которого $z_i^{(l)} = h_{ii}^{(l)}$, тогда элементы этого вектора будут показывать вероятность возвращения в исходное состояние для каждого узла сети при пересылке пакета в узел l .

В вершине 25 рассчитывается $\bar{\tau}_u^{(l)}$ вектор условных задержек (размерностью $n_u - 1$) в узлах сети при условии, что пакет не "застрял" в транзитных узлах. А в вершине 26 - вектор задержек доставки пакетов между каждым узлом и искомым l .

При определении суммарных потоков на ветвях и узлах сети был использован метод полиномиальной аппроксимации, позволяющий осуществлять декомпозицию СеМО на уровне первого момента распределения интервалов времени между пакетами в потоках, циркулирующих в сети.

В вершинах (33)-(36) рассчитываются потоки, поступившие и пропущенные по ветвям сети. Для этого в вершине (33) определяется $\bar{\lambda}_u^{(l)} = [\lambda_{ui}^{(l)}]_{n_u-1}$ - вектор суммарных потоков, втекающих в узлы сети и адресованных узлу l , в вершинах (34)-(35) рассчитываются $\hat{\lambda}^{(l)} = [\hat{\lambda}_{ij}^{(l)}]_{n_u \times n_u}$ и $\lambda^{(l)} = [\lambda_{ij}^{(l)}]_{n_u \times n_u}$ - матрицы интенсивностей, соответственно, пропущенных и поступивших потоков по ветвям сети, адресованных узлу l , а в вершине (36) вычисляется $\lambda = [\lambda_{ij}]_{n_u \times n_u}$ - матрица суммарных интенсивностей, поступивших на ветви сети и адресованных всем узлам сети.

Одной из характерных особенностей аппарата КДЦМ является то, что в результате обработки МПВ рассчитываются параметры качества обслуживания относительно узла l сразу для всех узлов сети. При этом сами параметры содержатся в векторах размерности $n_u - 1$. Очевидно, что для расчета характеристик качества обслуживания между каждой парой узлов необходимо перебрать все узлы, которые могут быть искомыми и для $\forall l \in [1, n_u]$ рассчитать вектора $\bar{b}_1^{(l)}, \bar{t}^{(l)}, \bar{z}^{(l)}, \bar{x}^{(l)}$.

Обозначим через $\wp = [\wp_{kl}]_{n_u \times n_u}$, $T = [t_{kl}]_{n_u \times n_u}$, $X = [x_{kl}]_{n_u \times n_u}$, $Z = [z_{kl}]_{n_u \times n_u}$ (вершины 27-30) матрицы размером $n_u \times n_u$, содержащие информацию о характеристиках качества обслуживания между каждой парой узлов. Матрица \wp будет содержать вероятности потерь пакетов, матрица T - возникающие при этом за-

держки, матрица X - число переприятий (хопов), матрица Z - вероятности за-
цикливания пакетов.

Обозначим через $\rho_{cp}, t_{cp}, x_{cp}, z_{cp}$ (вершины 31-34) среднесетевые характе-
ристики, а именно, вероятности успешной доставки пакетов, задержки, число
переприятий и вероятности зацикливания пакетов, через ρ_{cp} (вершина 35) -
среднесетевую загрузку сети.

На рис. 3 выделены вершины, непосредственно используемые для рас-
чета потоков. Это позволит более четко увидеть взаимосвязь между матри-
цами и векторами, используемыми для расчета потоков в стационарном ре-
жиме.

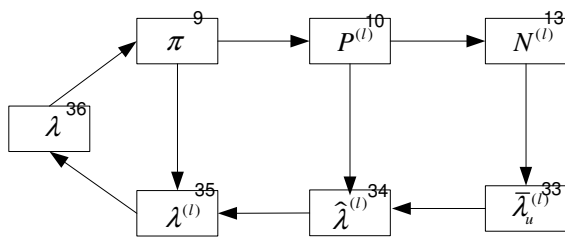


Рис. 3. Взаимосвязь между отдельными векторами и матрицами, влияющими на расчет потоков в стационарном режиме

СНАУ при использовании одного класса обслуживания

В компактном виде СНАУ, описывающая потоки на ветвях сети, будет
выглядеть следующим образом:

$$\lambda = \lambda_0$$

$$\begin{cases} P^{(l)} = f_p(M, \pi), & \forall l \in \overline{[1, n_u]} \\ N^{(l)} = f_N(P^{(l)}), & \forall l \in \overline{[1, n_u]} \\ \lambda = f_\lambda(P^{(l)}, N^{(l)}, \Lambda, \pi), \forall l \in \overline{[1, n_u]} \\ \pi = f_\pi(\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

Если записать эту систему в виде отдельных уравнений, то она будет содер-
жать переменные типа $\lambda_{ij}, \pi_{ij}, n_{ki}^{(l)}, p_{ij}^{(l)}$. Количество уравнений каждого типа и
переменные, входящие в эти уравнения, приведены в табл.1.

Таблица 1. Число различных типов переменных в системе

| Тип уравнения | Число уравнений | Число переменных типа | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| | | λ_{ij} | π_{ij} | $n_{ki}^{(l)}$ | $p_{ij}^{(l)}$ |
| $P^{(l)} = f_p(M, \pi)$ | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | — | r | — | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $N^{(l)} = f_N(P^{(l)})$ | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | — | — | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $\lambda = f_\lambda(P^{(l)}, N^{(l)}, \Lambda, \pi)$ | r | r | r | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | $n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $\pi = f_\pi(\lambda)$ | r | r | r | — | — |

Из этой таблицы видно, что число приведенных уравнений системы
(11) совпадает с числом неизвестных и равно $2 \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2 + 2 \cdot r$. Это означает,
что выполняется одно из необходимых условий существования единствен-
ного решения системы.

Для решения СНАУ (4) использован итерационный метод. Схема ите-
рационного процесса следующая. Задаются начальные условия - потоки на

ветвях сети. Перед началом первой итерации они могут быть нулевыми. Затем, перебирая все узлы, которые могут быть искомыми и, используя взаимосвязь, приведенную на рис. 3, вычисляются новые потоки. Полученные после первой итерации потоки используются для второй итерации. Итерационный процесс следует продолжать до тех пор, пока расхождения, достигнутые при расчете потоков на текущей и предыдущей итерациях, не будут меньше наперед заданной величины. При этом делается вывод о том, что решение СНАУ найдено. Обычно число требуемых итераций не превышает 3-5. Заметим, что при некоторых исходных данных решение СНАУ может отсутствовать. Это может иметь место тогда, когда сеть работает в экстремальных условиях. Например, когда нагрузка, поступающая на сеть, такова, что уровни загрузки отдельных ветвей приближаются к некоторому критическому порогу, при достижении которого незначительные колебания нагрузки приводят к резким изменениям потерь, длин очередей, задержек. Заметим, что нас будет интересовать, в основном, работа сети в нормальных условиях, не предполагающих резкую перегрузку отдельных каналов.

СНАУ при использовании нескольких классов обслуживания:

Современные мультисервисные сети обычно используют несколько классов обслуживания, при этом для каждого класса может использоваться как свой ПРИ, так и свои отдельные очереди в телекоммуникационных устройствах. В общем случае МТ для пакетов различных классов могут быть различными, поэтому сама МТ будет не 2-х мерной, а 3-х мерной, а в качестве третьего индекса элементов МТ $m^{(i)}(ij, s)$ будет выступать номер очереди.

Обозначим через M_i МТ i -узла, учитывающую особенности передачи трафика для каждого $s \in [1, S]$ класса обслуживания и имеющую размер $r_i \times (n_u - 1) \times S$. Тогда ПРИ для сети в целом может быть записан в виде:

$$M = \{M_1, \dots, M_i, \dots, M_{n_u}\}. \quad (5)$$

Рассмотрим приведенный на рис. 2 фрагмент узла. При передаче пакетов по сети с несколькими классами обслуживания необходимо определить не только исходящее из узла направление, по которому следует направить пакет дальше по сети, но и выходную очередь направления, соответствующую приоритету или классу обслуживания пакета. Пусть каждая выходная очередь обслуживается логическим каналом с пропускной способностью c_{ijs} , тогда трехмерный массив $C = [c_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$ будет содержать пропускные способности ветвей сети, выделяемые для передачи каждого класса трафика.

Введем следующие обозначения:

- Обозначим через $\Lambda = [\Lambda_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$ матрицу интенсивностей поступления потоков. Тогда элемент Λ_{kls} будет равен потоку s класса, который необходимо передать по сети между рассматриваемой парой узлов k и l .
- Через $\mu = [1, \dots, \mu_s, \dots, \mu_S]$ обозначим вектор размерности S , μ_s - элемент которого равен обратной величине среднего размера длины пакета в битах для трафика класса s .

- Обозначим через τ_{ijs} задержку при передаче пакета по ветви (ij) s - очередь, через π_{ijs} - вероятность ее блокировки, через o_{ijs} и ω_{ijs} - очередь и число мест ожидания, через λ_{ijs} - поток, поступающий на ветвь (ij) в s - очередь СБК, через ρ_{ijs} - уровень ее загрузки. Эти величины будем хранить в трехмерных массивах: $\boldsymbol{\tau} = [\tau_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\boldsymbol{\pi} = [\pi_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\mathbf{o} = [o_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\mathbf{w} = [w_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\boldsymbol{\rho} = [\rho_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$.

Обозначим через $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\mathbf{T} = [t_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\mathbf{X} = [x_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$, $\mathbf{Z} = [z_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$ матрицы размером $n_u \times n_u \times S$, содержащие информацию о характеристиках качества обслуживания между каждой парой узлов для каждого класса обслуживания. Матрица $\boldsymbol{\sigma}$ будет содержать вероятности потерь пакетов, матрица \mathbf{T} - возникающие при этом задержки, матрица \mathbf{X} - число преприемов (хопов), матрица \mathbf{Z} - вероятности зацикливания пакетов.

Поскольку на сетях с использованием нескольких классов обслуживания элементы МТ i - узла зависят от класса обслуживаемого, то для каждого класса обслуживания необходимо рассчитывать свою МПВ, которая, как и в случае с одним классом обслуживания, будет квадратной. Не изменится также вид матриц и векторов, являющихся результатом ее обработки.

Обозначим через $P_s^{(l)}$ МПВ, соответствующую s - классу обслуживания, а через $N_s^{(l)}$ - фундаментальную матрицу, тогда будет справедливо следующее:

$$\mathbf{P}^{(l)} = \{P_1^{(l)}, \dots, P_s^{(l)}, \dots, P_S^{(l)}\}; \mathbf{N}^{(l)} = \{N_1^{(l)}, \dots, N_s^{(l)}, \dots, N_S^{(l)}\}. \quad (6)$$

Для удобства будем хранить результаты вычислений соответствующих матриц и векторов в 3-х мерных массивах - $\mathbf{P}^{(l)} = [p_{ijs}^{(l)}]_{(n_u+1) \times (n_u+1) \times S}$, $\mathbf{N}^{(l)} = [n_{ijs}^{(l)}]_{(n_u+1) \times (n_u+1) \times S}$.

С учетом ранее введенных обозначений для случая с S классами обслуживания для элементов МПВ может быть записано:

$$\mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi}); \mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)}), \quad \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}], \quad \boldsymbol{\lambda} = f_\lambda(\boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{N}, \boldsymbol{\pi}). \quad (7)$$

Таким образом для случая с S классами обслуживания с учетом введенных в этом пункте обозначений аналогичная система будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}_0 \\ \mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi}), & \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}] \\ \mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)}), & \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}] \\ \boldsymbol{\lambda} = f_\lambda(\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{N}^{(l)}, \boldsymbol{\Lambda}, \boldsymbol{\pi}), & \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}] \\ \boldsymbol{\pi} = f_\pi(\boldsymbol{\lambda}) \\ \mathbf{C} = \sum_{s=1}^S \mathbf{C}_s \end{cases} \quad (8)$$

Если записать эту систему в виде отдельных уравнений, то она будет содержать переменные типа $\lambda_{ijs}, \pi_{ijs}, n_{kis}^{(l)}, p_{ijs}^{(l)}$. Количество уравнений каждого типа и переменные, входящие в эти уравнения, приведены в табл.2.

Таблица 2. Число различных типов переменных в системе

| Тип уравнения | Число уравнений | Число переменных типа | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | λ_{ijs} | π_{ijs} | $n_{kis}^{(l)}$ | $p_{ijs}^{(l)}$ |
| $\mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi})$ | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | — | $S \cdot r$ | — | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $\mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)})$ | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | — | — | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $\boldsymbol{\lambda} = f_\lambda(\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{N}^{(l)}, \mathbf{A}, \boldsymbol{\pi})$ | $S \cdot r$ | $S \cdot r$ | $S \cdot r$ | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ | $S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$ |
| $\boldsymbol{\pi} = f_\pi(\boldsymbol{\lambda})$ | $S \cdot r$ | $S \cdot r$ | $S \cdot r$ | — | — |

Из этой таблицы видно, что число приведенных уравнений системы (16) совпадает с числом неизвестных и равно $S \cdot 2 \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2 + S \cdot 2 \cdot r$. Это означает, что выполняется одно из необходимых условий существования единственного решения системы.

В четвертой главе получены соотношения и разработан метод расчета характеристик сети при использовании широковещательной рассылки пакетов для двух важнейших для практики случаев: для сетей с кольцевой топологией и топологиями, не содержащими петель. Последний случай имеет практический интерес для расчета сетей, построенных на Ethernet коммутаторах второго уровня. Составлены СНАУ. Разработан алгоритм решения систем, опирающийся на использовании итерационного метода.

Широковещательная рассылка пакетов на сетях с кольцевой топологией

Пусть пакет введен в сеть в узле k . Это означает, что одна его копия будет распространяться по сети по часовой стрелке, а вторая – против часовой стрелки. При этом две копии одного и того же пакета будут двигаться навстречу друг другу, пока не достигнут некоторого узла, в котором они встретятся. После чего считается, что пакет доставлен во все узлы сети и дальнейшая передача его по сети прекращается.

Обозначим через:

$[k]$ – узел-источник пакета;

(l) – узел-адресат пакета;

i – транзитный узел;

\rightarrow – направление распространения пакета от узла-источника к узлу-адресату;

$\bar{\xi}^{[k]}(\rightarrow)$ и $\bar{t}^{[k]}(\rightarrow)$ – векторы условных вероятностей и задержек, при условии, что пакеты достигают узлы, двигаясь по часовой стрелке (для кольцевой топологии);

$\bar{\xi}^{[k]}(\leftarrow)$ и $\bar{t}^{[k]}(\leftarrow)$ – векторы условных вероятностей и задержек, при условии, что пакеты достигают узлы, двигаясь против часовой стрелки (для кольцевой топологии);

$\xi^{[k]} = [\xi_{ij}^{[k]}]$ – матрица вероятностей поступления пакетов на ветви сети, которые введены в узле k и передаются методом широковещательной рассылки;

$\xi_i^{[k]}$, $t_i^{[k]}$ – вероятность достижения пакетом промежуточного узла i и возникающая при этом задержка для пакета, введенного в сеть в узле k ;

$\Xi = \{\bar{\xi}^{[1]}, \dots, \bar{\xi}^{[k]}, \dots, \bar{\xi}^{[n_u]}\}_{n_u}$ – , $T = \{\bar{t}^{[1]}, \dots, \bar{t}^{[k]}, \dots, \bar{t}^{[n_u]}\}_{n_u}$ – вероятности достижения пакетом конечных узлов и возникающие при этом задержки;

$\bar{\lambda} = [\bar{\lambda}_k]$ – вектор, элемент которого $\bar{\lambda}_k$ равен интенсивности поступления пакетов, введенных в узле $[k]$ и которые необходимо переслать по сети, используя широковещательный метод рассылки;

$\lambda_{ij}^{[k]}$ – интенсивность поступления пакетов на ветвь (ij) ;

$\lambda^{[k]} = [\lambda_{ij}^{[k]}]$ – матрица интенсивностей поступления пакетов на ветви сети, передаваемых методом широковещательной рассылки и введенных в сеть в узле k ;

$\lambda = [\lambda_{ij}]$ – матрица суммарных интенсивностей поступления пакетов на ветви сети, передаваемых методом широковещательной рассылки;

Взаимосвязь между используемыми для расчета отдельными переменными, векторами и матрицами приведена на рис. 4. Нетрудно видеть, что при известных π и τ можно рассчитать векторы $\bar{\xi}^{[k]}$, $\bar{t}^{[k]}$, а также матрицу $\lambda^{[k]}$. Перебрав все узлы k , которые могут быть исходными, можно заполнить все элементы матриц Ξ, T, λ . Но элементы матриц π и τ являются функциями от соответствующих элементов матрицы λ . Учитывая эту особенность, предложен итерационный алгоритм решения СНАУ, описывающей потоки в стационарном режиме.

СНАУ, описывающая потоки в стационарном режиме, будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Xi(\rightarrow) = f_{\Xi}(\Xi(\rightarrow), \pi) \\ \Xi(\leftarrow) = f_{\Xi}(\Xi(\leftarrow), \pi) \\ \Xi = f_{\Xi}(\Xi(\rightarrow), \Xi(\leftarrow)) \\ \lambda = f_{\lambda}(\Xi(\rightarrow), \Xi(\leftarrow), \bar{\lambda}) \\ T(\rightarrow) = f_T(T(\rightarrow), \tau) \\ T(\leftarrow) = f_T(T(\leftarrow), \tau) \\ T = f_T(T(\rightarrow), T(\leftarrow)) \\ \pi = f_{\pi}(\lambda) \\ \tau = f_{\tau}(\lambda) \end{array} \right. , \text{ где } \left\{ \begin{array}{l} \Xi(\rightarrow) = \{\bar{\xi}^{[1]}(\rightarrow), \dots, \bar{\xi}^{[k]}(\rightarrow), \dots, \bar{\xi}^{[n_u]}(\rightarrow)\} \\ \Xi(\leftarrow) = \{\bar{\xi}^{[1]}(\leftarrow), \dots, \bar{\xi}^{[k]}(\leftarrow), \dots, \bar{\xi}^{[n_u]}(\leftarrow)\} \\ \Xi = \{\bar{\xi}^{[1]}, \dots, \bar{\xi}^{[k]}, \dots, \bar{\xi}^{[n_u]}\} \\ T(\rightarrow) = \{\bar{t}^{[1]}(\rightarrow), \dots, \bar{t}^{[k]}(\rightarrow), \dots, \bar{t}^{[n_u]}(\rightarrow)\} \\ T(\leftarrow) = \{\bar{t}^{[1]}(\leftarrow), \dots, \bar{t}^{[k]}(\leftarrow), \dots, \bar{t}^{[n_u]}(\leftarrow)\} \\ T = \{\bar{t}^{[1]}, \dots, \bar{t}^{[k]}, \dots, \bar{t}^{[n_u]}\} \\ \bar{\lambda} = \{\bar{\lambda}_1, \dots, \bar{\lambda}_k, \dots, \bar{\lambda}_{n_u}\} \\ \lambda = \{\lambda^{[1]}, \dots, \lambda^{[k]}, \dots, \lambda^{[n_u]}\} \end{array} \right. \quad (9)$$

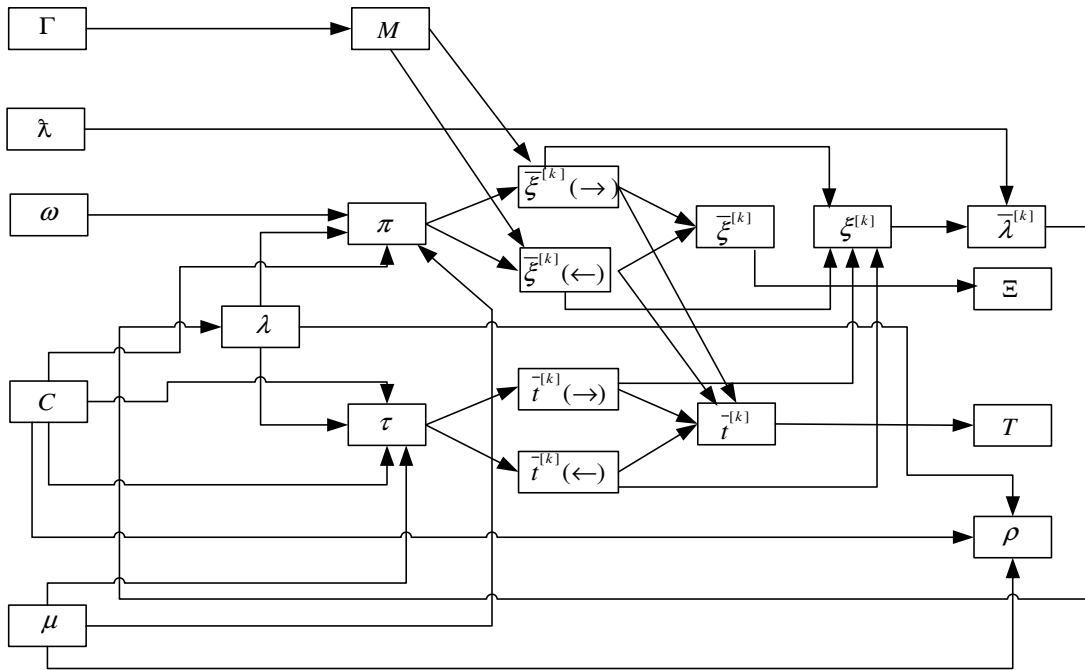


Рис. 4. Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами при использовании для передачи пакетов по сети с кольцевой топологией широковещательного режима рассылки

Число уравнений и переменных в этой СНАУ будет равно $6 \cdot n_u \cdot (n_u + 1)$. Разработан алгоритм ее решения, в основе которого лежит использование взаимосвязи 3.

Широковещательная рассылка пакетов на сетях с топологиями, не содержащих петель

Взаимосвязь между используемыми для расчета переменными, векторами и матрицами представлена в виде диаграммы на рис. 5, из которой четко просматривается взаимосвязь между элементами матриц и векторов $\lambda, \pi, \tau, \bar{\xi}^{[k]}, \bar{t}^{[k]}, \lambda^{[k]}$. Используя эту особенность, предложен итерационный алгоритм решения СНАУ, описывающей потоки в стационарном режиме.

СНАУ, описывающая потоки в стационарном режиме будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \Xi = f_{\Xi}(\Xi, \pi) \\ T = f_T(T, \tau) \\ \lambda = f_{\lambda}(\Xi, \bar{\lambda}) \\ \pi = f_{\pi}(\lambda) \\ \tau = f_{\tau}(\lambda) \end{cases}, \quad \text{где} \quad \begin{cases} \Xi = \{\xi^{[1]}, \dots, \xi^{[k]}, \dots, \xi^{[n_u]}\} \\ T = \{t^{[1]}, \dots, t^{[k]}, \dots, t^{[n_u]}\} \\ \lambda = \{\lambda^{[1]}, \dots, \lambda^{[k]}, \dots, \lambda^{[n_u]}\} \end{cases}. \quad (10)$$

Число уравнений системы совпадает с числом переменных и равно $2 \cdot n_u^2 + 3 \cdot r$.

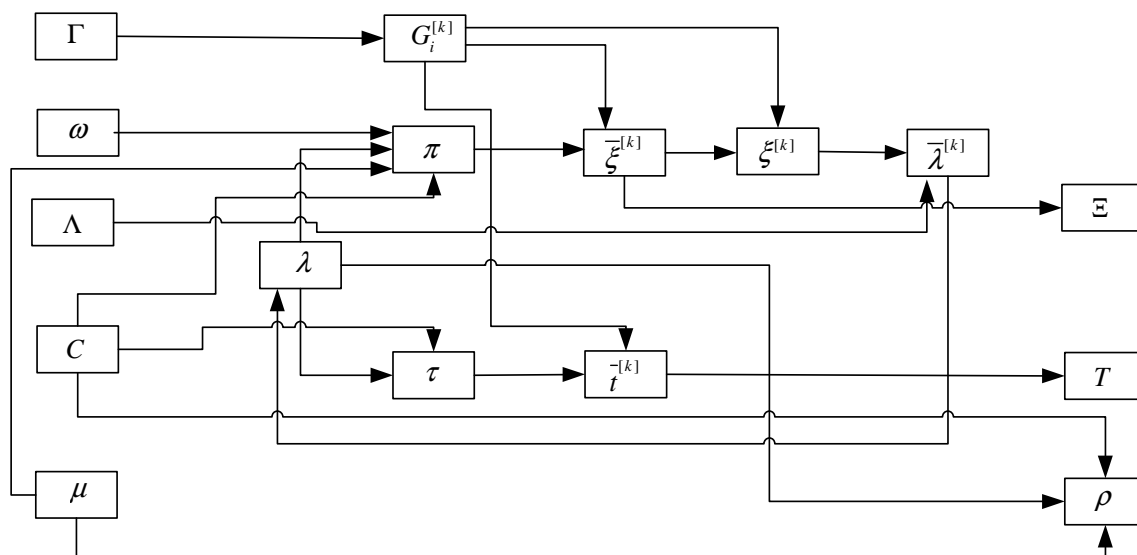


Рис. 5. Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами при использовании для передачи пакетов по сети, не содержащей петлю широковещательного режима рассылки

В пятой главе получены соотношения и разработан метод расчета характеристик сетей при использовании для передачи пакетов по сети направленной волны.

Взаимосвязь между используемыми для расчета переменными, векторами и матрицами при использовании МНВ представлена в виде диаграммы на рис. 6. В ней четко просматривается взаимосвязь между элементами матриц и векторов λ , π , τ , $\bar{\xi}^{[k]}$, $t^{-[k]}$, $\bar{\lambda}^{[k]}$. Эта особенность использована, для выбора метода решения СНАУ, описывающего потоки в стационарном режиме.

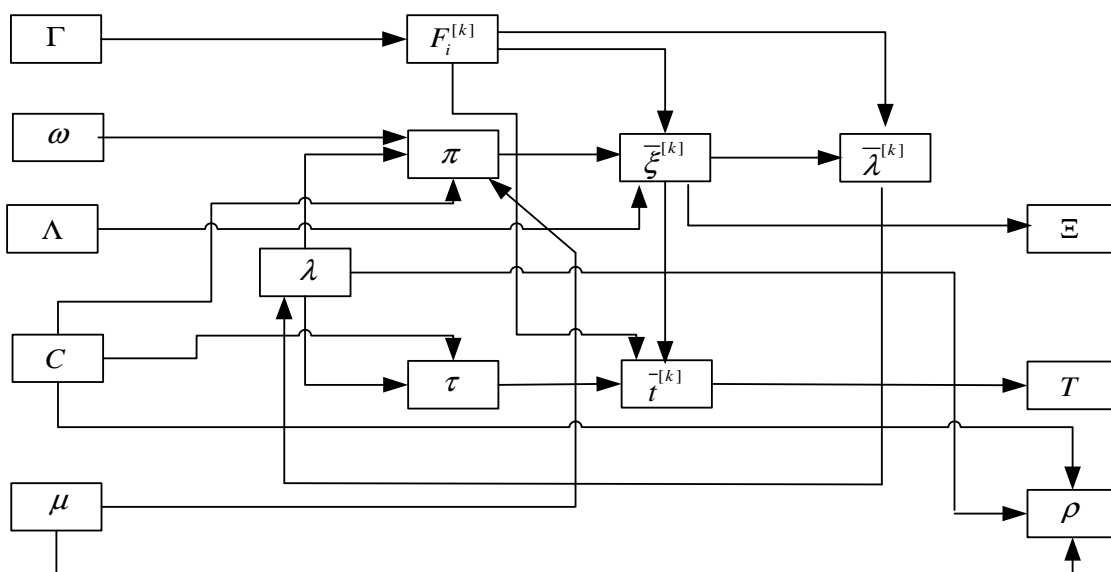


Рис. 6. Взаимосвязь между отдельными переменными, векторами и матрицами при использовании для передачи пакетов МНВ

СНАУ, описывающая потоки на ветвях сети, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 \\ \Xi = f_{\Xi}(\Xi, \pi) \\ T = f_T(\Xi, T, \pi, \tau) \\ \lambda = f_{\lambda}(\Xi, \Lambda) \\ \pi = f_{\pi}(\lambda) \\ \tau = f_{\tau}(\lambda) \end{cases}, \text{ где } \begin{cases} \Xi = [\bar{\xi}^{[1]}, \dots, \bar{\xi}^{[k]}, \dots, \bar{\xi}^{[n_u]}] \\ T = \{t^{-[1]}, \dots, t^{-[k]}, \dots, t^{-[n_u]}\} \end{cases}. \quad (11)$$

Число уравнений системы совпадает с числом переменных и равно $2 \cdot n_u \cdot (n_u - 1) + 3 \cdot r$.

В шестой главе на конкретных примерах проиллюстрировано использование разработанных методов, а также получены результаты, представляющие интерес для проектирования магистралей мультисервисных сетей.

Расчитаны ВВХ при построении магистрали мультисервисной сети с различными типами топологий, а также при использовании для построения магистрали систем спектрального уплотнения. Исследовано влияние на характеристики сети изменения нагрузки, пропускной способности каналов, структуры тяготения, числа классов обслуживания, места обрыва канала, а также совместного воздействия нескольких факторов.

Ниже, в качестве примера (рис. 7), приведены результаты расчетов для следующих исходных данных:

- топология – кольцевая;
- число узлов – 8;
- характер тяготения – централизованный;
- количество центров тяготения – 1, номер ЦМУ – 1;
- число классов обслуживания – 4;
- тип СМО, описывающей СБК – M/D/1/N;
- варианты расчета:

вариант 1а. Пропускная способность каналов на каждом участке $C = 1$ Гбит/с;

вариант 1б. Пропускная способность каналов на каждом участке $C = 2$ Мбит/с;

варианты 2а и 2б. Отличаются от вариантов 1а и 1б тем, что пропускная способность ветвей (1-2) и (1-8) удвоена;

- нагрузка на сеть – меняющаяся. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ - интенсивности поступления пакетов соответственно 1, 2, 3 и 4 классов прием равными λ , которая изменяется в диапазоне $\lambda = 0 - 7,5 \cdot 10^3$ пак/с при $C = 1$ Гбит/с и $\lambda = 0 - 1,5 \cdot 10^1$ пак/с при $C = 2$ Мбит/с (заметим, что диапазон изменения нагрузки выбран таким образом, чтобы уровни загрузки ветвей для $C = 1$ Гбит/с и $C = 2$ Мбит/с совпадали).

- размеры пакетов 1 - 4 классов:
 $l_{pak1} = 500[бум]$, $l_{pak2} = 1000[бум]$, $l_{pak3} = 5000[бум]$,
 $l_{pak4} = 15000[бум]$;
- доля пропускной способности каналов сети, отводимая для передачи пакетов 1 - 4 классов: $C_1 = 0,1 \cdot C$; $C_2 = 0,1 \cdot C$; $C_3 = 0,3 \cdot C$; $C_4 = 0,5 \cdot C$;
- размер буферной памяти для каждого класса обслуживания $\omega = 10[пак]$.

На основании этих исходных данных выполнены расчеты:

- $t_{sr4}, t_{sr3}, t_{sr2}, t_{sr1} = f(\lambda)$ - зависимости среднесетевых задержек от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2);
- $\rho_{sr4}, \rho_{sr3}, \rho_{sr2}, \rho_{sr1} = f(\lambda)$ - зависимости среднесетевых потерь от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов обслуживания до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2).

Соответствующие графики приведены на рис. 8, 9. Цифрами в кружочках на графиках отмечены номера вариантов расчета. Цифра “1” соответствует случаю, когда пропускные способности всех каналов сети равны между собой. Цифрой “2” помечены графики, когда пропускные способности наиболее перегруженных ветвей (1-8) и (1-2) удвоены. Заметим, что некоторые оси на графиках имеют по две шкалы. Значения на первой проставлены обычным шрифтом и соответствуют $C = 1$ Гбит/с. Значения на второй выделены жирным шрифтом и соответствуют $C = 2$ Мбит/с.

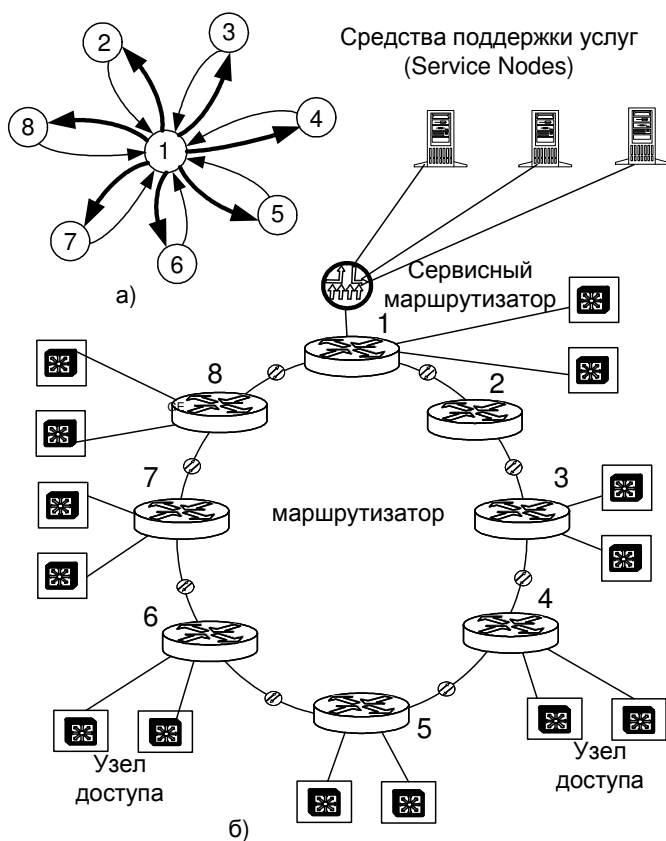


Рис. 7. Пример построения магистрали транспортной сети с кольцевой топологией:

а) - структура тяготения; б) - топология сети

Как видно из приведенных графиков, среднесетевые характеристики существенно зависят от класса обслуживания. При этом наименьшие задержки и потери соответствуют первому классу, а наибольшие – четвертому классу обслуживания.

Разброс среднесетевых задержек для $C = 1$ Гбит/с и $C = 2$ Мбит/с составляет для 4-го класса около 50%, для 3-го – 27%, для 2-го - 13%, для 1-го – 6%. Причем, если для $C = 1$ Гбит/с, несмотря на существенные колебания задержек для 3 и 4 классов обслуживания, задержки все равно оказываются пренеб-

режительно малыми и составляют порядка $(10^{-5} - 10^{-4})$ с, то для $C = 2$ Мбит/с с задержками приходится уже считаться, поскольку их порядок составляет уже $(10^{-2} - 10^{-1})$ с. Таким образом, разделение трафика на классы и резервирование за каждым классом обслуживания определенной полосы пропускания позволяет предоставить необходимый уровень сервиса для различных категорий пользователей.

Расчеты показали, что наибольшую нагрузку испытывают каналы непосредственно подключенные к широкополосному маршрутизатору доступа.

Для наглядности на одних и тех же рисунках приведены характеристики до и после удвоения пропускных способностей наиболее перегруженных ветвей при изменении нагрузки. Анализ этих цифр показывает, что разброс среднесетевых задержек существенно уменьшился и составил для 4-го класса около 40%, для 3-го – 16%, для 2-го – 8%, для 1-го – 4%. Таким образом, удвоение пропускной способности ветвей (1-8) и (1-2) привело не только к резкому уменьшению задержек доставки пакетов, но и уменьшению их разброса.

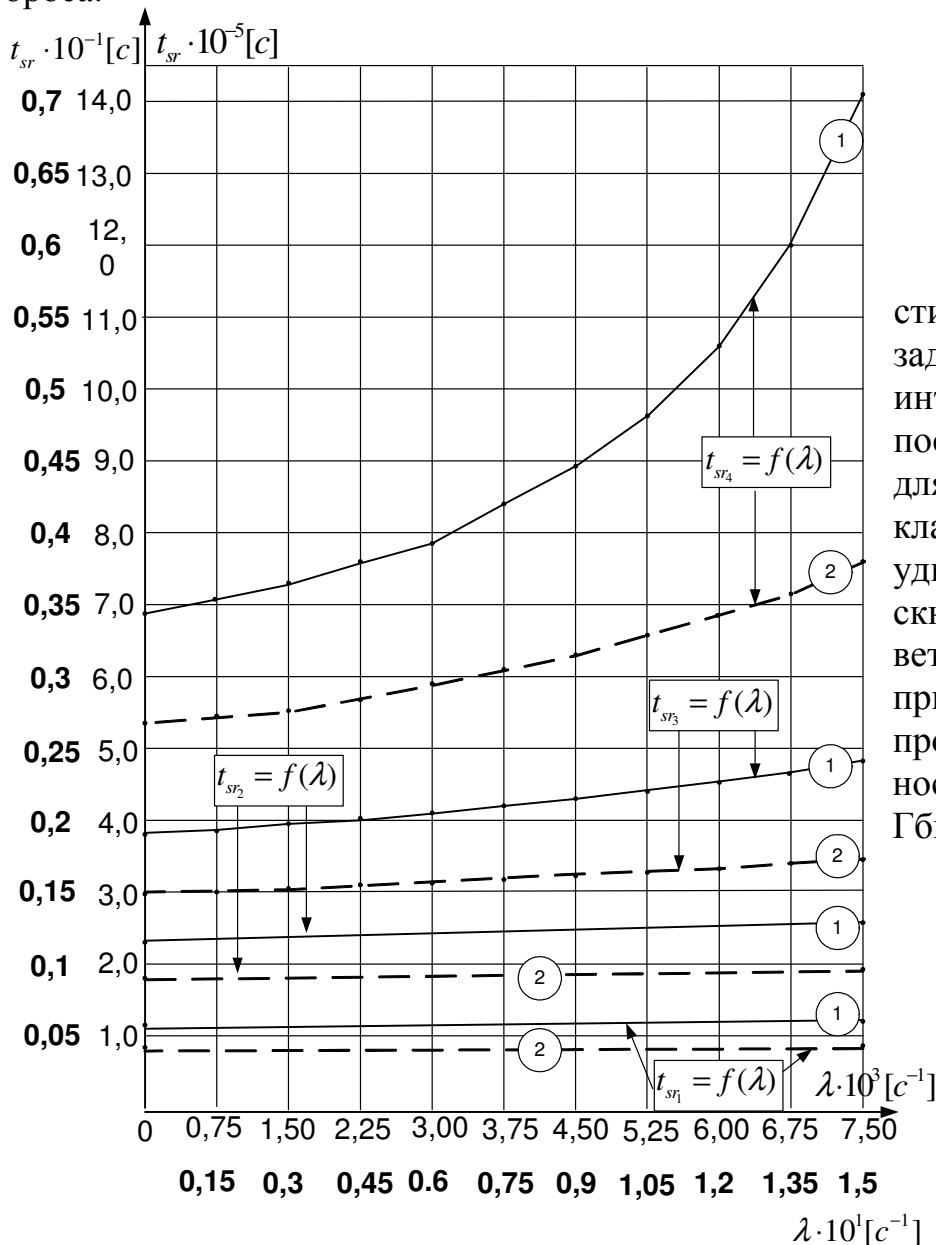


Рис. 8. Зависимости среднесетевых задержек от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2) при двух значениях пропускной способности магистрали: 10 Гбит/с и 2 Мбит/с

На рис. 9 показаны зависимости вероятностей среднесетевых потерь как функции от поступающей на сеть нагрузки при двух значениях C . При выбранных исходных данных для $C = 1$ Гбит/с и $C = 2$ Мбит/с они совпадают. Среднесетевые потери изменяются в диапазонах: $\varphi_{sr_4} = 0 - 3,65 \cdot 10^{-3}$, $\varphi_{sr_3} = 0 - 1,61 \cdot 10^{-7}$, $\varphi_{sr_2} = 0 - 5,46 \cdot 10^{-11}$, $\varphi_{sr_1} = 0 - 2,86 \cdot 10^{-15}$. Наименьшие потери соответствуют 1-му классу обслуживания, наибольшие – 4-му классу. Вероятность потерь для передачи большинства типов трафика не должна превышать 10^{-3} . После удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2), вероятности потерь уменьшились более, чем на порядок.

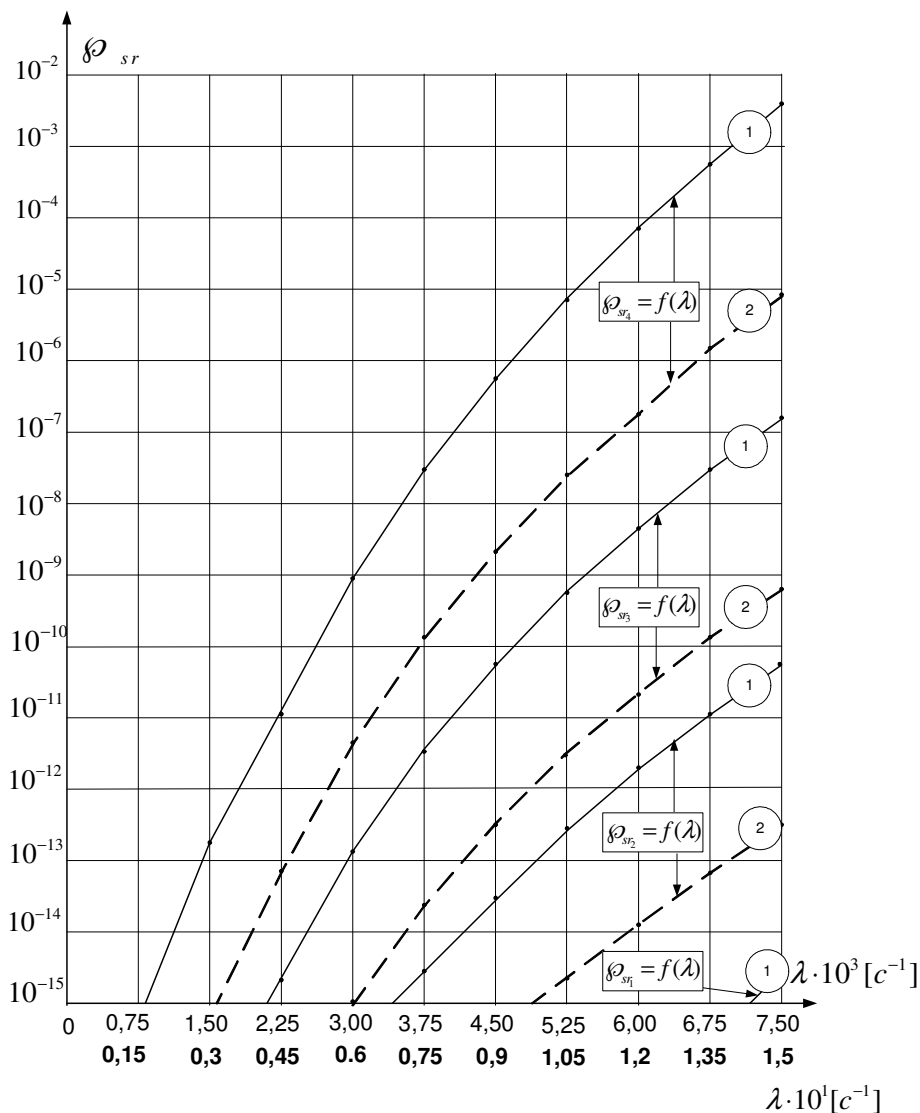


Рис. 9. Зависимости среднесетевых потерь от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов обслуживания до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2) при двух значениях пропускной способности магистральной ветви: 1 Гбит/с и 2 Мбит/с

На многочисленных примерах проиллюстрировано использование разработанных методов для решения задачи анализ сетей. В частности, приведены результаты расчета ВВХ для услуги - широкополосный доступ в Интернет, при использовании в качестве магистральной кольцевой топологии. Рассчитаны уровни загрузок ветвей сети. Выявлены ветви, склонные к перегрузкам. Исследован процесс накопления задержек при передаче нисходящего трафика. Оценен эффект от удвоения пропускной способности наиболее перегруженных ветвей. Для топологии, приведенной на рис. 7, в режиме большой на-

грузки удвоение скорости привело к тому, что уровень загрузок наиболее загруженных участков уменьшился с 0,790 до 0,395, что привело к уменьшению очередей на этих направлениях с 3,76 до 0,649 пакетов. Столь существенное сокращение очереди уменьшило время передачи пакетов между центральным магистральным узлом (ЦМУ) 1 и МУ 2 с $7,14 \cdot 10^{-4}$ [с] до $1,12 \cdot 10^{-4}$ [с], что, в свою очередь, привело к сокращению задержек между ЦМУ 1 и всеми другими узлами сети.

Показано, что характеристики качества обслуживания могут быть существенно улучшены при подключении к магистрали второго BRAS. После введения второго центра тяготения среднесетевые задержки t_{sr} уменьшились с $5,56 \cdot 10^{-5}$ до $2,52 \cdot 10^{-5}$ [с], т.е. более чем в два раза. При этом задержки между центральным узлом (ЦУ) и наиболее удаленным МУ t_{max} сократились с $9,11 \cdot 10^{-5}$ до $3,91 \cdot 10^{-5}$ [с]. Среднесетевые потери φ_{sr} уменьшились с $5,61 \cdot 10^{-4}$ до $2,30 \cdot 10^{-6}$, а потери φ_{max} между ЦУ и наиболее удаленным МУ сократились с $7,91 \cdot 10^{-4}$ до $4,14 \cdot 10^{-6}$, т.е. практически на два порядка. В среднем уменьшились расстояния в числе переприемов x_{sr} между ЦУ и МУ с 2,29 до 1,33, а также расстояние между наиболее удаленными ЦУ и МУ с 4 до 2 переприемов.

Исследовано влияние на характеристики сети места обрыва кольца. Показано, что, несмотря на то, что сеть не теряет связность, задержки могут увеличиться в разы. Рассчитаны ВВХ при построении магистрали с использованием систем спектрального уплотнения, а также магистрали с топологией типа квадратная ячейка. Исследовано влияние на характеристики сети изменение нагрузки, пропускной способности каналов, структуры тяготения, числа классов обслуживания, места обрыва канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной в диссертационной работе целью получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Проведен анализ существующего состояния сетей традиционного Оператора и сценариев их развития, рассмотрена архитектура сети переходного периода, получена оценка требуемой пропускной способности магистрали мультисервисной сети для крупного областного центра.
2. Сформулирован методологический подход к построению моделей и разработке методов расчета характеристик мультисервисных сетей.
3. Получены соотношения, описывающие типовые топологии магистралей мультисервисных сетей в терминах теории множеств, что позволяет генерировать топологии сетей большой размерности.
4. Для описания потоков на ветвях и узлах сети в стационарном режиме при адресной (unicast) рассылке пакетов составлена СНАУ, решение которой позволяет рассчитать для каждой категории обслуживания время задержки и вероятности потерь пакетов между каждой парой узлов сети, а также потоки на ветвях и узлах сети, задержки, вероятности блокировок и уровни загрузок каналов.

5. Составлены СНАУ, описывающая потоки на ветвях и узлах сети при широковещательной рассылке пакетов (broadcast) для двух важнейших для практики частных случаев – для сетей с кольцевой топологией и для сетей с топологиями без петель. Ее решение позволяет рассчитать все основные показатели качества обслуживания.
6. Для метода направленной волны, занимающего промежуточное положение между табличными (unicast) и широковещательными (broadcast) методами, составлена СНАУ, описывающая потоки на ветвях и узлах сети при адресной рассылке пакетов в стационарном режиме. Ее решение позволяет рассчитать такие важнейшие параметры, как время задержки и вероятности потерь кадров между каждой парой узлов сети, а также потоки на ветвях и узлах сети; задержки, вероятности блокировок и уровни загрузок каналов.
7. Разработаны методы, позволяющие рассчитывать характеристики сети в условиях совместного воздействия различных факторов в том числе при изменениях нагрузки, структуры тяготения, пропускной способности каналов, при отказе оборудования и обрывах каналов, числа классов обслуживания.
8. Получены результаты расчетов, позволяющие определить наиболее критические места на сети в условиях совместного воздействия различных факторов, оценить эффект от разделения пакетов на классы обслуживания.

Таким образом, в результате выполненных исследований решена научно-техническая проблема создания моделей, методов и алгоритмов анализа современных сетей, в том числе и с несколькими классами обслуживания, что имеет важное народно-хозяйственное значение для отрасли связи.

Основное содержание работы полностью раскрывается в следующих публикациях

Монография

1. Гавлиевский, С.Л. Методы анализа мультивервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания / С.Л. Гавлиевский. – М.: ИРИАС, 2010. – 365с.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для анализа сетей с пакетной коммутацией / С.Л. Гавлиевский // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Серия «Технические науки». – 2000. – № 8. – С. 63–77.
3. Гавлиевский, С.Л. Соотношения для расчета элементов матриц переходных вероятностей при использовании стохастических маршрутных таблиц / С. Л. Гавлиевский // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – Т.4, № 4. – С. 7–10.
4. Гавлиевский, С.Л. Соотношения для расчета элементов матриц переходных вероятностей при использовании простых маршрутных таблиц для сетей с пакетной коммутацией / С.Л. Гавлиевский // Вестник Самарского государственного

- ного технического ун-та. Серия «Технические науки». – 2005. – №39. – С. 31-36.
5. Гавлиевский, С.Л. Описание типовых топологий мультисервисных сетей в терминалах теории множеств / С.Л. Гавлиевский // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Серия «Технические науки». – 2006. – № 41. – С. 64-70.
 6. Гавлиевский, С.Л. Соотношения для расчета характеристик сетей с кольцевой топологией / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2008. – № 1. – С. 2-8.
 7. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для расчета сетей с кольцевой топологией / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2008. – № 4. – С. 2-7.
 8. Гавлиевский, С.Л. Соотношения для расчета характеристик сетей на базе коммутатора Ethernet второго уровня / С.Л. Гавлиевский // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т.5, № 4. – С. 56-60.
 9. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для расчета характеристик сетей на базе коммутаторов ETHERNET второго уровня / С.Л. Гавлиевский // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т.6, № 4. – С. 50-55.
 10. Гавлиевский, С.Л. Соотношения для расчета характеристик сетей при использовании метода направленной волны / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2007. – №1. – С. 19-24.
 11. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для расчета характеристик сетей при использовании метода направленной волны / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2007. – №2. – С. 26-30.
 12. Гладкий, В.С. Численные методы анализа процессов маршрутизации на сетях с ЭВМ / В.С. Гладкий, С.Л. Гавлиевский // Программирование. – 1986. – № 3. – С. 78-87.
 13. Гавлиевский, С.Л. Итерационный метод расчета характеристик магистралей транспортных сетей связи / С.Л. Гавлиевский // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Серия «Технические науки». – Самара. – 2011. – № 3 (31). – С. 54-60.
 14. Гавлиевский, С.Л. Итерационный метод расчета характеристик сетей при использовании для рассылки пакетов направленной волны / С.Л. Гавлиевский // Вестник Воронежского государственного ун-та. Серия «Системный анализ и информационные технологии». – 2011. – №2. – С.64–70.
 15. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для исследования свойств магистралей транспортных сетей при использовании нескольких классов обслуживания / С.Л. Гавлиевский // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т. 9, №4. – С. 23–27.
 16. Гавлиевский, С.Л. Исследование влияния места отказа канала на магистрали транспортной сети с кольцевой топологией при передаче ассиметричного трафика / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2012. – №3. – С.32-37.
 17. Гавлиевский, С.Л. Итерационный метод расчета характеристик при использовании широковещательного режима рассылки пакетов на сетях с топологиями, не содержащими петель / С.Л. Гавлиевский // Телекоммуникации. – 2012. – №3. – С.2-7.

Публикации в других изданиях

18. Гавлиевский, С.Л. Некоторые особенности накопления задержек при передаче

- пакетов по сети с кольцевой топологией / С.Л. Гавлиевский // Инфокоммуникационные технологии. – 2012.
19. Гавлиевский, С.Л. О некоторых методах маршрутизации на сетях связи / С.Л. Гавлиевский // Техника средств связи. Серия ВТСС. – 1985. – № 2. – С. 55–60.
 20. Гавлиевский, С.Л. Об одном децентрализованном методе маршрутизации для сетей микроЭВМ с ненадежными каналами / С.Л. Гавлиевский / Теория и практика проектирования микропроцессорных систем. Сборник научных трудов. – Куйбышев. – 1989. – С. 13–17.
 21. Гавлиевский, С.Л. Итерационный метод расчета характеристик сетей с коммутацией сообщений / С.Л. Гавлиевский // Сетеметрия, анализ и моделирование информационно – вычислительных сетей: межвузовский сборник статей. – Куйбышев. – 1988. – С. 21–28.
 22. Гавлиевский, С.Л. Модели для расчета характеристик сетей с коммутацией пакетов / С.Л. Гавлиевский // Автоматизация научных исследований: межвузовский сборник научных трудов. – Куйбышев. – 1989. – С. 58–63.
 23. Gavlievskii, S.L. Relations for Calculating Characteristics of Networks Using a Directional Wave Method / S.L.Gavlievskii // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Volume 68, Issue 5. – С. 415–427.
 24. Гавлиевский, С.Л. Некоторые особенности системного анализа крупномасштабных компьютерных сетей / С.Л.Гавлиевский // Автоматика и информационные технологии: тез. юбилейной научно-технической конференции « 35 лет ФАИТ и 90 лет со дня рождения основателя факультета профессора Л.Ф. Куликовского». – Самара, 1995. – С. 57-58.
 25. Гавлиевский, С.Л. Тенденции развития региональных информационных сетей / С.Л. Гавлиевский, Катин В.Ф. // VI Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – ПГАТИ, Самара, 1999.
 26. Гавлиевский, С.Л. Аналитические модели для системного анализа сетей передачи данных / С.Л. Гавлиевский // VI Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – ПГАТИ, Самара, 1999. – С. 59.
 27. Гавлиевский, С.Л. Тенденции развития региональных информационных сетей в посткризисный период / С.Л. Гавлиевский // VII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. Часть 1. – ПГАТИ, Самара, 2000. – С.70.
 28. Гавлиевский, С.Л. Варианты построения узлов доступа Интернет-провайдеров / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // VIII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: тез. докл. – Самара, 2001. – С. 99-100.
 29. Гавлиевский, С.Л. Построение мультисервисной сети регионального оператора / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // VIII Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: тез. докл. – Самара, 2001. – С. 98-99.
 30. Гавлиевский, С.Л. Сетевые решения по построению современных корпоративных сетей / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // IX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2002. – С.55-56.
 31. Гавлиевский, С.Л. Экономические аспекты построения мультисервисных се-

- тей / С.Л. Гавлиевский, А.А. Солонская // Компьютерные технологии в науке и образовании: тез. докл. межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2002. – С. 27-28.
32. Гавлиевский, С.Л. Вопросы построения мультисервисных сетей / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // Компьютерные технологии в науке и образовании: тез. докл. межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2002. – С. 28-29.
 33. Гавлиевский, С.Л. Автоматизация процесса выбора оборудования для решения проблемы «последней мили» / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // IX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2002. – С. 56.
 34. Гавлиевский, С.Л. Варианты организации абонентского доступа при построении СПД / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // X Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2003. – С. 64.
 35. Гавлиевский, С.Л. Использование технологий Fast и Gigabit Ethernet для построения IP-сетей / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // X Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – ПГАТИ, Самара, 2003. – С. 62.
 36. Гавлиевский, С.Л. Перспективы развития мультисервисных сетей в Поволжском регионе / С.Л. Гавлиевский, Сироткина О.В. // X Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2003.
 37. Гавлиевский, С.Л. Практические аспекты проектирования мультисервисных сетей операторского класса / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина, Д.А. Ещенко // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2004. – С. 69-72.
 38. Гавлиевский, С.Л. Использование системного подхода при планировании развития мультисервисной сети регионального оператора связи / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды шестой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2007. – С. 29-32.
 39. Гавлиевский, С.Л. Построение ЛВС школы с подключением к сети Интернет при помощи широкополосного доступа / С.Л. Гавлиевский, Е.А. Воронцова // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды шестой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2007. – С. 199-201.
 40. Гавлиевский, С.Л. Использование системного подхода при проектировании сетей широкополосного доступа / С.Л. Гавлиевский // Развитие широкополосного доступа на сетях электросвязи России: материалы 2-го семинар - совещания. – Москва, 2008. – С. 8-9.
 41. Гавлиевский, С.Л. Архитектура мультисервисной сети регионального оператора связи в переходный период / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды седьмой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2008. – С. 31-34.
 42. Гавлиевский, С.Л. Выбор технологии построения сети доступа для подключения конечных пользователей к услугам мультисервисных сетей / С.Л.

- Гавлиевский, О.В. Сироткина // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды седьмой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2008. – С. 34-37.
43. Гавлиевский, С.Л. Статистическое моделирование процессов распределения потоков на однородных сетях связи ячеистого типа / С.Л. Гавлиевский // Всесоюзный научно-технический семинар. ЦСП-84: тез. докл. – Новосибирск, 1984. – С. 35-36.
 44. Гладкий, В.С. Метод получения плана распределения потоков вызовов путем коррекции начального плана / В.С. Гладкий, С.Л. Гавлиевский // Всесоюзный научно-технический семинар. ЦСП-84: тез. докл. – Новосибирск, 1984. – С. 37-38.
 45. Гладкий, В.С. Статистическое моделирование методов управления на однородных ячеистых сетях связи / В.С. Гладкий, С.Л. Гавлиевский // X научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: тез. докл. – М.: Радио и связь, 1984. – С. 18.
 46. Гавлиевский, С.Л. Некоторые методы управления маршрутизацией на сетях связи с ненадежными элементами / С.Л. Гавлиевский // Проблемы, методы и опыт создания автоматизированных систем управления связью: тез. докл. научно-технической конференции. – Москва, 1985. – С. 45-46. Для служебного пользования.
 47. Гладкий, В.С. Численный анализ обменных процессов на сетях ЭВМ с коммутацией пакетов / В.С. Гладкий, С.Л. Гавлиевский // II Всесоюзная школа-семинар по вычислительным сетям: тез. докл. – М.: Рига, 1986. – С. 31-34.
 48. Бахарева, Н.Ф. Программный комплекс для расчета характеристик и системного анализа мультисервисных сетей / Н.Ф. Бахарева, С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды восьмой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2009. – С. 71-74.
 49. Гавлиевский, С.Л. Особенности развития мультисервисных сетей традиционных операторов в условиях экономического кризиса / С.Л. Гавлиевский, В.Г. Карташевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды восьмой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2009. – С. 87-90.
 50. Гавлиевский, С.Л. Использование новейших информационных технологий при построении единой интегрированной сети связи для ОАО «АК «Транснефть» / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды восьмой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2009. – С. 90-93.
 51. Гавлиевский, С.Л. Основные направления развития и модернизации телекоммуникационных сетей операторов фиксированной связи в условиях экономического кризиса / С.Л. Гавлиевский, В.Г. Карташевский // Десятая международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТ и ТТ-2009. Седьмая международная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» ОТТ-2009: материалы конференции. – Самара, 2009. – С. 120–121.
 52. Бахарева, Н.Ф. АРМ проектировщика мультисервисных сетей связи / Н.Ф. Бахарева, С.Л. Гавлиевский // Десятая международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТ и ТТ-

2009. Седьмая международная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» ОТТ-2009: материалы конференции. – Самара, 2009. – С. 125–127.
53. Гавлиевский, С.Л. Основные технические решения построения СПД Самарского научного центра РАН / С.Л. Гавлиевский, А.А. Солонская // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: тез. докл. Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2003. – С. 37.
54. Гавлиевский, С.Л. Основные технические решения для построения мультисервисной сети ОАО «Волгателеком» / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: тез. докл. Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2003. – С. 36.
55. Гавлиевский, С.Л. Практические аспекты проектирования мультисервисных сетей на принципах NGN / С.Л. Гавлиевский, О.В. Сироткина, Д.А. Ещенко // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2005. – С. 133–135.
56. Гавлиевский, С.Л. Построение сети доступа к мультисервисным услугам для квартирного сектора градообразующего предприятия / С.Л. Гавлиевский, А.А. Скрябина // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2005. – С. 135–137.
57. Гавлиевский, С.Л. Расчет характеристик и использование свойств магистралей транспортных сетей при использовании нескольких классов обслуживания / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды девятой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2010. – С. 17–19.
58. Гавлиевский, С.Л. Математическая модель для расчета показателей качества обслуживания при использовании нескольких классов обслуживания / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды девятой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2010. – С. 13–16.
59. Гавлиевский, С.Л. Методы анализа распределенных информационно-вычислительных, компьютерных, телекоммуникационных систем и сетей / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды десятой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2011. – С. 231–233.
60. Гавлиевский, С.Л. Планирование развития мультисервисных сетей / С.Л. Гавлиевский // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды десятой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2011. – С. 234–236.
61. Гавлиевский, С.Л. Построение системы IP-телефонии для альтернативного оператора / С.Л. Гавлиевский, А.А. Скрябина // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2004. – С. 73–76.
62. Гавлиевский, С.Л. Узел IP-сети для подготовки системных администраторов корпоративных сетей и сетей Интернет сервис провайдеров / С.Л. Гавлиевский, А.А. Солонская // Компьютерные технологии в науке, практике и обра-

- зовании: тез. докл. Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2003. – С. 78.
63. Гавлиевский, С.Л. Использование систем спектрального уплотнения для повышения пропускных способностей транспортных магистралей мультисервисных сетей / С.Л. Гавлиевский, О.В. Пыстогова // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: труды девятой Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара, 2010. – С. 9–13.
64. Гавлиевский, С. Л. Технологии и сетевые решения, используемые при построении сети Интернет: учеб. пособ. / С.Л. Гавлиевский. - Самара: СамГТУ, 2006. – 74 с.
65. Гавлиевский, С. Л. Построение компьютерных сетей на базе коммутаторов Ethernet: учеб. пособ. / С.Л. Гавлиевский. – Самара: СамГТУ, 2006. – 67 с.

Научное издание

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С
НЕСКОЛЬКИМИ КЛАССАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Специальность 05.12.13 -
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Подписано в печать 10.02.2012. Формат 60x84_{1/16}

Усл. печ. л. 2,0.

Заказ № 1175. Тираж 100.

Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы Поволжского
Государственного университета телекоммуникаций и информатики
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77
Тел.: (846) 228-00-44