

ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ им. А.С. ПОПОВА

ЛОЖКОВСКИЙ АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

УДК 621.395

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА**

05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Одесса – 2010

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова
Министерства транспорта и связи Украины

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Захарченко Николай Васильевич,
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
проректор по учебной работе

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ящук Леонид Емельянович,
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
профессор кафедры сетей и систем почтовой связи

доктор технических наук, профессор
Климаш Михаил Николаевич,
Национальный университет «Львовская политехника»,
заведующий кафедрой телекоммуникаций

доктор технических наук, профессор
Савченко Юлий Григорьевич,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
профессор каф. звукотехники и регистрации информации

Защита состоится 23. сентября 2010 г. в 10 часов на заседании
специализированного ученого совета Д 41.816.02, Одесская национальная ака-
демия связи им. А.С. Попова, ул. Кузнечная, 1, 65029, г. Одесса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесской националь-
ной академии связи им. А.С. Попова, ул. Кузнечная, 1, 65029, г. Одесса.

Автореферат разослан _____. _____ 2010 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета, д.т.н.

Т.А. Цалиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Научно обоснованное планирование и оптимизация телекоммуникационных систем и сетей, предоставляющих услуги с заданными показателями качества обслуживания, – это сложная научно-техническая и экономическая проблема, без решения которой невозможно создание информационной инфраструктуры, отвечающей потребностям развитого общества. В развитии бизнеса телекоммуникационных компаний этот фактор является важнейшим при обосновании действий администрации, направленных на повышение эффективности работы сети и качества обслуживания пользователей.

Решение данной проблемы основывается на решении задач анализа и синтеза телекоммуникационных систем. Анализ – это получение и сравнение реальных характеристик качества функционирования системы с проектными и предоставление объективных оценок, позволяющих установить причины снижения качества обслуживания и дать рекомендации по устранению этих причин. Синтез – это определение структурных параметров системы при заданных потоках, дисциплине и качестве обслуживания. Комплексное решение этих задач позволяет оптимизировать структуру сети на продолжительную перспективу. В условиях развития телекоммуникаций в соответствии с концепцией сетей следующего поколения *NGN*, обеспечивающих предоставление неограниченного набора услуг с заданными характеристиками качества обслуживания (*QoS*), данные вопросы становятся еще более актуальными. Технология распределения информации в *NGN* определяет степень сложности узлов коммутации, которая влияет на качество обслуживания обмена информацией между терминалами пользователей. Качество обслуживания потоков информации влияет и на сами характеристики передачи информации (задержки пакетов IP-телефонии снижают качество телефонной связи). Таким образом, расширение спектра предоставляемых услуг и возрастающая сложность телекоммуникационных систем и сетей требует решения проблемы разработки адекватных методов анализа и синтеза этих систем с целью получения достоверных оценок их характеристик, реализации задач их оптимизации относительно выбранного критерия качества обслуживания и разработки соответствующих алгоритмов управления ними.

Процессы функционирования сетей и систем связи можно представить совокупностью систем массового обслуживания (СМО), для которых определяются характеристики *QoS*. Одним из классов СМО в телекоммуникациях являются системы распределения информации (СРИ), к которым относятся сети связи в целом или отдельные коммутационные узлы, например, пакетные коммутаторы, обслуживающие по определенным алгоритмам сообщения телекоммуникационных служб. Количественная сторона процессов обслуживания потоков сообщений (трафика) в СРИ является предметом теории телетрафика. Эта теория сформировалась как самостоятельная научная дисциплина и представляет собой набор вероятностных методов решения проблем проектирования новых и эксплуатации действующих систем телекоммуникаций.

Создание теории телетрафика начато с научных работ Эрланга А.К. (известные *B-* и *C-формула* Эрланга). Ее развивали такие ученые, как *Burce P.J., Crommelin C. D., Kleinrock L., O'Dell G.F., Palm C., Pollaczek F., Wilkinson R.I.*

Существенный вклад в развитие теории телетрафика внесли представители русской научной школы: Хинчин А. Я., Башарин Г.П., Лившиц Б.С., Харкевич А.Д., Севастьянов Б.А., Нейман В.И, Степанов С.Н., Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Мейкшан В.И. и академики АН Украины Гниденко Б.В., Коваленко И.М., Королюк В.В. Вкладом в теорию являются учебники и научные работы Шнепса М.А., Корнышева Ю.Н. и других.

По теории телетрафика разрабатываются научно обоснованные методы оценки характеристик QoS , причем, прежде всего, учитывается стохастический характер трафика. Основным содержанием этой теории является исследование пропускной способности СРИ, что тесно связано с оценкой показателей качества обслуживания трафика и требует учета многих факторов.

Теория телетрафика оперирует не самими СРИ, а их математическими моделями. Многообразие видов и топологий сетей, структур систем и способов выделения сетевого ресурса для обслуживания трафика требует разработки моделей, учитывающих еще и реальный характер потоков сообщений, и детали обслуживания мультисервисного трафика разных коммуникационных приложений (речь, видео, данные). Поэтому невозможно построить единую модель, отвечающую на все вопросы по функционированию новых сетей связи. Именно на основе применяемых моделей СРИ разрабатываются методы оценки характеристик QoS , достоверность которых зависит от адекватности модели реальной ситуации, которая может возникнуть при проектировании и эксплуатации.

Оценка качества обслуживания трафика является одним из важнейших научных направлений в исследованиях телекоммуникационных сетей. На этом базируется продуманная и целенаправленная стратегия модернизации современных сетей на этапе их конвергенции и замены технологии коммутации каналов на коммутацию пакетов. Принципы функционирования сети обусловлены режимами переноса информации, а качество обслуживания – реальным характером трафика. В этих условиях необходима разработка новых методов анализа и синтеза СРИ, адекватно отображающих реальные процессы обмена информацией в сети. Это обеспечит дальнейшее развитие теории телетрафика и обогатит практический инструментарий среды проектирования инфокоммуникационных сетей, что в свою очередь обеспечит ощутимую экономию затрат на строительство и эксплуатацию сетей связи. Благодаря более точным расчетам повысится качество обслуживания и пропускная способность СРИ. Новые методы оценки характеристик QoS необходимы в системах динамического управления сетями для перераспределения их ресурсов и оптимизации трафика сети в целом на основе заданного (нормированного) качества обслуживания.

Таким образом, при системном подходе к проблеме планирования и оптимизации телекоммуникационных систем и сетей невозможно обойтись без математических методов анализа, синтеза и оценки качества предоставления информационных услуг в условиях реальных потоков сообщений. Отсутствие таких методов приводит к принятию неоптимальных решений в процессе разработки, проектирования и эксплуатации телекоммуникационных систем, и сетей поскольку возникает резкое несоответствие между ожидаемыми (проектными) показателями и реальным качеством обслуживания.

Состояние научно-практической проблемы. Телетрафик – это не только классические телефонные сообщения, но и потоки сообщений в новых инфокоммуникационных сетях. Специфические особенности разных СРИ увеличивают проблемы разработки универсальных методов их анализа и синтеза. Особенно сложна эта проблема для моделей трафика, адекватных реальным процессам формирования его потоков. Природа поступления потоков и их обслуживания зависит от конкретного вида системы и сети, структурного состава абонентов, спектра предоставляемых услуг и других факторов.

В теории телетрафика разработан ряд математических моделей и методов решения задач анализа и синтеза СРИ для условий идеализированной пуассоновской модели трафика. Однако набор этих методов недостаточно полон с точки зрения структурных особенностей реальных СРИ, дисциплин обслуживания и особенно характера трафика. Реальному трафику мультисервисных сетей связи присуща большая неравномерность интенсивности нагрузки, чем это предусмотрено классической моделью пуассоновского потока. Для таких моделей потока теория телетрафика не имеет соответствующих методов расчета и на практике оценка характеристик QoS мультисервисных сетей связи часто ведется приближенными методами и средствами имитационного моделирования. „Нерезультативность” существующих методов поясняется тем, что они ориентированы на использование лишь первых моментов распределений случайных величин, характеризующих интенсивность трафика и функционирование СРИ. При обслуживании мультисервисного трафика большое влияние на характеристики QoS оказывают и высшие моменты распределений названных величин, определяющих характер и степень неравномерности трафика.

Анализ научных публикаций показывает, что многие теоретические разработки невозможно использовать на практике. Это связано с такими недостатками теоретических исследований, как: применение математического аппарата, не адекватно отображающего процессы в телекоммуникационных сетях; неудачный выбор показателей и критериев оценки предлагаемых решений; попытка получения аналитических зависимостей характеристик телекоммуникационных сетей в границах, где аналитический аппарат не работает; разработка методов, которые, улучшая один из параметров телекоммуникационной системы, в конце концов, снижают эффективность функционирования всей системы в целом; определение закономерностей, в составе которых есть начальные данные, получить которые невозможно.

С учетом значимости данной научной проблемы можно утверждать, что проблема развития теории телетрафика путем ее обогащения новыми методами анализа и синтеза СРИ, функционирующих в условиях обслуживания мультисервисных потоков трафика, особенно актуальна в современных условиях конвергенции сетей и построения на этой основе сетей нового поколения *NGN*.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Направление диссертационного исследования связано с концепцией развития связи Украины до 2010 года, утвержденной Постановлением Кабинета Министров Украины № 2238 от 09.12.1999, и с задачами „Перечня государственных научно-технических программ по приоритетным направлениям развития науки и

техники Украины на 2006-2010 годы”, утвержденным Постановлением Кабинета Министров Украины № 1716 от 24.12.2006.

В диссертации обобщены и систематизированы результаты научной работы, выполняемой автором в ряде научно-исследовательских работ ОНАС им. А.С. Попова. Результаты диссертационной работы использованы в хозяйственных НИР, выполненных по заказу Государственной администрации связи Украины: „Разработка методики создания системы автоматизированного проектирования (САПР) цифровых городских сетей электросвязи” (НИР № 5-1-98, гос. рег. номер 0198U007489, 2004 г.); по заказу ОАО „Укртелеком”: „Разработка ведомственных строительных норм "Станционные сооружения телефонных сетей"” (НИР № 240/117, гос. рег. номер 0102U001914, 2006 г.); „Разработка "Правил технической эксплуатации цифровых систем коммутации" для местных телефонных сетей”, (НИР № 902-244, гос. рег. номер 0104U009252, 2004 г.); „Разработка проекта концепции развития ОАО “Укртелеком” до 2010 года” (НИР № 423-1822, гос. рег. номер 0105U007417, 2005 г.); „Разработка корпоративных стандартов "Методика проектирования сетей мультисервисного абонентского доступа на базе медных кабелей" и "Методика проектирования оптических и радиосетей мультисервисного абонентского доступа"” (НИР № 343-1821, гос. рег. номер 0105U007118, 2005 г.); „Разработка корпоративного стандарта общества "Общеканальная сигнализация № 7. Контроль и тестирование"” (НИР № 801821-402, гос. рег. номер 0107U006770, 2007 г.); „Разработка корпоративного стандарта общества "Методика проектирования сети общеканальной сигнализации № 7"” (НИР № 801821-403, гос. рег. номер 0107U006771, 2007 г.).

Цель и задачи исследования. Диссертация посвящена решению фундаментальной научной проблемы – разработке новых методов анализа и синтеза структурно-сложных систем распределения информации, телекоммуникационных и инфокоммуникационных сетей, функционирующих в условиях мультисервисного трафика. Средством достижения цели является решение следующих основных задач:

- анализ моделей систем распределения информации и механизмов оптимизации их пропускной способности;
- анализ методов теории массового обслуживания, используемых для расчета систем распределения информации, и анализ сфер их применения;
- анализ статистических характеристик потоков трафика современных сетей связи, базирующихся на технологиях коммутации каналов и пакетов;
- разработка новых методов оценки характеристик QoS , адекватных модели трафика сетей связи с однородными потоками требований;
- разработка новых методов оценки характеристик QoS , адекватных модели трафика мультисервисных сетей с разнородными потоками требований;
- разработка новых методов оценки характеристик QoS , адекватных модели трафика мультисервисных пакетных сетей связи;
- разработка имитационной модели СРИ для обслуживания трафика с разнообразными вероятностными законами распределения его параметров и

продолжительности обслуживания требований;

- статистическое моделирование, анализ результатов и оценка точности результатов моделирования и точности предложенных методов;
- исследование влияния законов распределения длительности обслуживания на характеристики QoS в условиях мультисервисного трафика;
- исследование влияния явления самоподобности трафика на пропускную способность мультисервисной сети связи;
- исследование вероятностно-временных параметров мультисервисного трафика и видов их распределения.

Объект исследования – процессы предоставления мультисервисных услуг в сетях связи.

Предмет исследования – методы анализа и синтеза систем распределения информации в условиях мультисервисного трафика, образуемого потоками требований на предоставление телекоммуникационных услуг; качество обслуживания в условиях мультисервисного трафика.

Методы исследования. Исследования диссертационной работы выполнены с применением теории систем массового обслуживания, теории телетрафика и теории вероятностей. Для оценки точности предложенных решений применены методы объектно-ориентированного программирования и имитационного моделирования с использованием методов математической статистики.

Научная новизна полученных результатов. Получила дальнейшее развитие теория телетрафика, которую дополнено новыми, впервые разработанными методами расчета качества обслуживания мультисервисного трафика, что служит основой анализа и синтеза наиболее распространенных в телекоммуникациях моделей систем распределения информации:

1. Для полнодоступной системы серверов (каналов, линий) с ожиданием, представленной моделью $M/D/m/\infty$, разработан новый метод расчета качества обслуживания, в котором основные характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ рассчитываются по характеристикам модели $M/M/m/\infty$ с использованием S -формулы Эрланга и впервые полученной аппроксимирующей функции, зависящей от емкости системы и интенсивности нагрузки. Данный метод удобный для компьютерного анализа и значительно проще метода Кроммелина, в котором на практике для инженерных расчетов вместо точных аналитических формул применяются соответствующие диаграммы Кроммелина.

2. Для симметричной пакетной сети доступа, описываемой моделью $M_B/M/m$, разработан рекуррентный метод расчета пропускной способности, учитывающий возможность взаимосвязи между источниками трафика в границах кластера сети. Для обеспечения точности расчеты выполняются для каждого автономного сегмента сети доступа в целом, не разделяя его на отдельные узлы доступа, соединенные каскадно. Для упрощения синтеза сети в случае симметричного кластера использованы макросостояния, что позволило применить комбинаторные соотношения. Макросостояния – это множества состояний кластера, в каждом из которых все состояния равновероятны.

3. Впервые для полнодоступной системы серверов (каналов, линий) с потерями, представленной моделью $HM/D/m$, определена функция распределе-

ния стационарных вероятностей состояний системы, учитывающая дисперсию интенсивности нагрузки. Гиперэкспоненциальная (*HM*) модель трафика, как обобщение идеализированной пуассоновской модели, по своим свойствам является адекватной к модели трафика мультисервисных сетей с разнородными потоками требований, а это позволяет рассчитывать характеристики функционирования таких систем более точно.

4. Впервые для полнодоступной системы серверов (каналов, линий) с потерями, представленной моделью $HM/D/m$ и где рекуррентный поток с гиперэкспоненциальным распределением интервала времени между заявками приводит к нормальному распределению количества требований за условную единицу времени, разработан новый метод расчета вероятности потери требования, учитывающий скученность интенсивности нагрузки или пик-фактор трафика.

5. Впервые для полнодоступной системы серверов (каналов, линий) с очередью, представленной моделью $HM/D/m/\infty$, разработан новый итерационный метод расчета характеристик качества обслуживания, учитывающий увеличение интенсивности нагрузки и ее стандартного отклонения, получаемые за счет дополнительного потока требований, поступающего в систему из очереди. Метод основан на аппроксимации распределения состояний системы (серверов и очереди) нормальным законом распределения.

6. Впервые для односерверной модели $fBM/G/1/\infty$ разработан энтропийный метод оценки характеристик качества обслуживания самоподобного трафика, сводящийся к применению методов расчета известных распределений, энтропия которых совпадает с энтропией состояний системы при обслуживании самоподобного трафика. Метод дает на порядок более точные результаты, чем ныне применяемая формула Норроса для модели $fBM/D/1/\infty$.

7. Для односерверной системы с очередью (модель $G/M/1/\infty$) предложен метод оценки характеристик качества обслуживания, опирающийся на геометрическое распределение количества требований в СРИ в моменты поступления новых требований, а не на распределения, которые не зависят от момента прибытия требования в систему. В связи с этим вероятность ожидания не совпадает с вероятностью занятости системы, как при пуассоновском потоке, и рассчитывается из закона распределения продолжительности ожидания в системе.

8. Для односерверной модели с очередью $G/D/1/\infty$ при постоянном обслуживании предложен приближенный метод оценки характеристик качества обслуживания, основанный на методе расчета модели $G/M/1/\infty$ и приближенной оценке различия во времени ожидания требований в очереди и в системе.

9. Впервые для односерверной модели с очередью $G/G/1/\infty$ установлены все функциональные соотношения между характеристиками качества обслуживания, что позволяет рассчитывать любую из характеристик *QoS* по приближенной оценке хотя бы одной из них. Данная модель является обобщением всех иных односерверных моделей с неограниченной очередью.

10. Для сетей сигнализации ОКС № 7 предложен новый метод оценки производительности каналов сигнализации на сетевом и транспортном уровнях эталонной модели *OSI*, что может применяться для сетей фиксированной связи и соединений с мобильными и пакетными сетями передачи данных.

11. Для сетей мобильной связи впервые разработан метод расчета вероятности отказа в предоставлении радиоканала, учитывающий не только дисперсию продолжительности пребывания мобильного абонента в зоне действия одной базовой станции, а и дисперсию интенсивности нагрузки и вид закона распределения продолжительности сеанса связи мобильного абонента.

Практическое значение полученных результатов. Данными исследованиями созданы основы для:

- достоверного анализа, синтеза и прогнозирования качества функционирования СРИ в условиях обслуживания мультисервисного трафика;
- поиска оптимальных путей модернизации существующих сетей связи и повышения качества предоставления телекоммуникационных услуг;
- принятия обоснованных решений при разработке высокоэффективной и надежной телекоммуникационной техники нового поколения.

Для применения полученных результатов в практической деятельности по разработке, планированию и эксплуатации телекоммуникационных систем все теоретические результаты диссертации доведены автором до конкретных инженерных методик, алгоритмов и программ. Разработанные программные средства, модели и инструментарии предназначены для использования в исследованиях и проектировании современных телекоммуникационных сетей.

Практически значимыми результатами диссертационной работы есть:

- оригинальная среда проектирования – компьютерная программа „Система автоматизированного проектирования телекоммуникационных сетей”, предназначенная для выполнения рабочих проектов по строительству и реконструкции телекоммуникационных сетей. Все расчетные алгоритмы программы построены на основе предложенных в диссертации новых методов анализа и синтеза систем распределения информации и поэтому возможно решение задач оптимизации характеристик стоимости и качества обслуживания проектированной сети, функционирующих в условиях реальных потоков трафика;
- оригинальный инструментарий имитационного моделирования – компьютерная программа „Моделирование систем массового обслуживания”, в которой методами имитационного моделирования можно дать количественную оценку эффективности систем распределения информации, функционирующих в условиях реальных моделей трафика, сравнить способы повышения пропускной способности и улучшения характеристик качества обслуживания и выбрать для них наиболее рациональные технические решения;
- обновлена учебная дисциплина „Теория массового обслуживания в телекоммуникациях” для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению „Телекоммуникации”, в которую введены математические модели и методы анализа и синтеза СРИ, в которых учтены тип реального поступающего потока, структура системы распределения информации и дисциплина обслуживания. По новой программе курса издан учебник.

Практические результаты диссертационной работы внедрены в нормативных стандартах ОАО „Укртелеком” и учебном процессе, что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад соискателя. Все результаты научных, теоретических и практических исследований, изложенные в диссертации, получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, диссертанту принадлежит: [2] – раздел 9 и приложение; [13, 14, 19] – разработка метода расчета характеристик Qos ; [10, 22] – анализ свойств телекоммуникационных сетей и разработка метода; [11, 35] – постановка задачи, разработка алгоритма и программного кода программы имитационного моделирования; [12] – постановка задачи, анализ концепций построения и развития сетей NGN; [29] – формулирование концептуального направления работы и теоретические исследования; [32] – постановка задачи, методика, алгоритмы и программный код программы автоматизированного проектирования; [34, 36, 37, 40, 41, 43] – постановка задачи, анализ методов расчета телекоммуникационных служб мультисервисных сетей.

Апробация результатов диссертации. Теоретические и практические результаты диссертационной работы представлены на ряде международных и всеукраинских симпозиумах, научно-технических конференциях, семинарах:

- VII и VIII международные НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”, Одесса, 2003 и 2004;
- II и III международные семинары „Информационные системы и технологии”, Одесса, 2004 и 2005;
- международная НПК „Современное состояние, проблемы и перспективы развития ТфСОП в Украине”, Киев, 2004;
- II международный симпозиум „Телекоммуникации без границ”, Одесса, 2005;
- IX международная конференция "Проблемы функционирования информационных сетей", Новосибирск, 2006;
- III и IV международные НТК „Современные проблемы радиоэлектроники, телекоммуникаций и приборостроения”, Винница, 2007 и 2009.
- The 2-nd International Conference „Telecommunication, Electronics and Informatics”, Chishinau, 2008.
- НМК „Современные проблемы телекоммуникаций и подготовка специалистов в области телекоммуникаций”, Львов, 2009.
- НТК профессорско-преподавательского состава Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова, 2003 – 2010.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 44 научные работы. Из них: 1 – учебник, утвержденный Министерством транспорта и связи Украины; 1 – нормативный документ ВСН Украины (в соавторстве); 23 – статьи в профессиональных научных изданиях, рекомендованных ВАК Украины для опубликования научных работ соискателей (7 в соавторстве); 2 – свидетельства о регистрации авторского права на произведение Украины; 17 – в материалах и тезисах международных симпозиумов, конференций и семинаров.

Диссертационная работа объемом 267 страниц состоит из введения, семи разделов, выводов, списка использованных источников из 150 наименований на 8 страницах, 2 приложений. Диссертация содержит 25 иллюстраций и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыты сущность и состояние научной проблемы, обоснована ее значимость, сформулированы цель и научная новизна работы, определены практическая ценность и сфера применения полученных результатов, представлена общая характеристика работы.

В первом разделе – „Модели систем распределения информации и методы теории массового обслуживания для их анализа и синтеза” – рассмотрены общие положения теории телетрафика, основные математические модели и типы СРИ телекоммуникационных сетей, методы исследования СРИ, фундаментальные результаты исторического развития теории телетрафика, основные виды служб телекоммуникационных сетей и нормирование качества их услуг.

Построение математической модели, адекватно отображающей реальную СРИ в условиях разнообразия типов трафика и топологий сетей, структур систем и способов выделения сетевого ресурса является сложной задачей, а потому невозможно построить единые модель и методы анализа и синтеза СРИ.

Анализ методов исследования СРИ показывает, что несмотря на их численность, абсолютно точные аналитические результаты получены для малого количества моделей СРИ. Методы дифференциальных и интегральных уравнений, дополнительных переменных и дополнительных событий, метод фаз Эрланга, цепи Маркова (Δt -метод), вложенные цепи Маркова, кусочно-линейные марковские процессы и полумарковские процессы, позволили решить задачи анализа и синтеза СРИ только для моделей $M/G/m$, $M/M/m/\infty$, $M/M/m/r$, $M_B/M/m$, $M/D/m/\infty$, $M/G/1/\infty$. Эти результаты отображены в работах Эрланга, Энгсета, Кроммелина и Поллачека-Хинчина. Для других систем, например, обобщенной модели $GI/G/m/\infty$, получены частичные или приближенные результаты.

Сфера применения указанных методов определяется количеством не экспоненциально распределенных величин, характеризующих поведение элементов исследуемой СРИ. Однако экспонентные случайные процессы присущи только пуассоновской модели трафика, которая не соответствует реальным потокам мультисервисных сетей связи. Имеющиеся методы анализа и синтеза СРИ ориентированы на использования лишь средних значений случайных величин, характеризующих трафик и систему. При обслуживании мультисервисного трафика на характеристики QoS влияет и степень неравномерности указанных величин, в частности дисперсия интенсивности нагрузки.

Усложнение математических моделей СРИ современных сетей связи не позволяет для их анализа, синтеза и оптимизации применять классические методы исследования, а это заставляет применять приближенные методы, методы статистического моделирования в сочетании с аналитическими методами.

Результаты исследований, приведенных в разделе 1, опубликованы в работах автора [1, 3, 12, 18, 26, 29, 33, 34, 38, 39, 44].

Во втором разделе – „Математические модели трафика современных телекоммуникационных сетей” – проанализированы способы математического описания потоков требований в СРИ; представлены результаты исследований параметров трафика в мультисервисных сетях и математическая модель мультисервисного трафика в пакетных сетях связи.

Развитие телекоммуникационных технологий, новые принципы построения сетей связи, изменение структурного состава абонентов и спектра предоставляемых услуг увеличивают неравномерность интенсивности трафика, которая измеряется дисперсией σ^2 интенсивности нагрузки Λ . Результаты статистических измерений параметров трафика позволяют выделить три типа реального трафика, к которым следует применять определенные математические модели: I тип – однородный трафик; II тип – разнородный трафик; III тип – пачечный трафик пакетных сетей.

Первый тип присущ моносервисным сетям связи. В телефонных сетях из-за единственности услуги передачи речевых сообщений трафик является однородным. В мультисервисных сетях в отдельных сегментах сети трафик тоже может быть однородным. Например, в случае доступа абонентов с близкими удельными интенсивностями нагрузки только к части услуг сети, или отдельными потоками пакетов IP-телефонии создается однородный трафик. Такой трафик описывается моделью пуассоновского потока с экспоненциальным (M) распределением интервалов времени между требованиями, где значения интенсивности нагрузки Λ и его дисперсии σ^2 совпадают.

Второй тип присущ мультисервисным сетям связи, где из-за интегрального характера сетей и расширенного спектра предоставляемых услуг трафик является разнородным. Реальные потоки формируются множеством источников с разной удельной интенсивностью нагрузки. В процессе создания общего потока требований принимают участие источники, принадлежащие к той или другой группе потребителей сервиса с близкими удельными интенсивностями. Значение интенсивности результирующего потока в каждый миг зависит от того, к какой группе по интенсивности нагрузки принадлежит источник и каково соотношение численности этих источников с другими. Более адекватно такой поток описывается не экспонентным распределением интервалов времени между требованиями, а их смесью – гиперэкспонентным распределением

n -го порядка $P(z) = \sum_{i=1}^n p_i \lambda_i e^{-\lambda_i z}$ (часто аппроксимация приемлема уже при $n = 2$).

Этим в модели обеспечивается больший разброс интервала времени между требованиями, при котором σ^2 превышает Λ от единиц до десятков раз. Соотношения данных параметров – это коэффициент скученности нагрузки или пик-фактор трафика $S = \sigma^2 / \Lambda$. Он определяет степень различия моделей мультисервисного и пуассоновского трафика. Гиперэкспонентное распределение интервала между требованиями приводит к нормальному закону распределения количества требований за среднюю продолжительность их обслуживания. Поэтому математическая модель реальных потоков мультисервисных сетей – это гиперэкспонентный поток требований (HM) с нормальным распределением интенсивности нагрузки Λ , при котором $S > 1$ (практические измерения дают значения S в пределах 2, ..., 15).

Третий тип присущ пакетным сетям связи. Здесь потоки пакетов формируются множеством источников требований на предоставляемые сетью услуги и сетевых приложений, обеспечивающих услуги передачи видео, данных,

речи. Абоненты, создающие трафик, существенно отличаются между собой значениями удельной интенсивности нагрузки, и потому трафик не только разнородный, но и с долгосрочными зависимостями в интенсивности (например, из-за повторной передачи неверно принятых пакетов) и с определенными требованиями к QoS . Здесь передачу потоков разных служб обеспечивает единая сеть с едиными протоколами и законами управления. Поскольку источники каждой службы имеют разные скорости передачи информации или изменяют ее в процессе сеанса связи, то объединенному потоку пакетов присуща «пачечность» трафика (*burstness*), измеряемая коэффициентом пачечности. Это обуславливает еще большую неравномерность трафика, при которой σ^2 превышает Λ уже от 15 до 60 раз и больше. Теперь учет в расчетах лишь Λ и σ^2 является недостаточным для получения надежных и точных результатов. Для пачечного трафика применима модель самоподобного (*self-similarity*) процесса, которая еще не исследована в полной мере. В качестве распределений интервала времени между требованиями, которые приводят к *самоподобным* процессам (*fBM*), выбираются распределения с так называемым „длинным хвостом”, т. е. распределения Парето, Вейбулла или логарифмически нормальный закон.

Результаты исследований, приведенные в разделе 2, опубликованы в работах автора [1, 19, 20, 24, 30, 36, 37, 40, 41].

В третьем разделе – „Методы анализа и синтеза систем распределения информации в условиях однородного трафика” – рассмотрены модели трафика, формируемые потоками требований к однотипным услугам, в отдельных сегментах мультисервисной сети или от небольших групп абонентов. Разработан метод расчета характеристик качества обслуживания модели $M/D/m/\infty$ с очередью и рекуррентный метод расчета пропускной способности симметричной пакетной сети доступа, представленной моделью $M_B/M/m$ с потерями.

Трафик формируется потоками заявок к службам сети на предоставление услуг, показатели качества которых нормируются рекомендациями ИТУ. Иногда необходимы и не нормированные характеристики QoS , которые важны для детального анализа функционирования СРИ, например, с целью ее оптимизации.

Для модели $M/D/m/\infty$ при дисциплине очереди *FIFO* есть решение Кроммелина, в котором использованы уравнения состояний Фрая. Система уравнений для каждого случая решается методом производных функций. Эти вычисления настолько сложны, что практически вместо точных аналитических формул применяются диаграммы Кроммелина. Для данной модели разработан новый метод расчета качества обслуживания, в котором основные характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ рассчитываются по характеристикам модели $M/M/m/\infty$ с использованием *C*-формулы Эрланга и полученной аппроксимирующей функции, зависящей от емкости системы и интенсивности нагрузки.

Установлено, что величины средней продолжительности ожидания в системе W при постоянной (D) и экспонентной (M) продолжительности обслуживания находятся в таком соотношении:

$$W_{(D)} = W_{(M)} \cdot 2 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^2 = \frac{C_m(\Lambda)}{m - \Lambda} \cdot 2^1 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Множитель к $W_{(M)}$ в (1) определяет, что при $\Lambda = m$ продолжительность $W_{(D)} = W_{(M)} / 2$, т. е. различие в 2 раза, которое соответствует такому же результату для системы $M/G/1/\infty$. С ростом m это различие спадает и в широком диапазоне изменения m и Λ точность оценки (1) не хуже $\pm 5\%$. С такой же точностью определено и соотношение вероятностей ожидания при экспонентной и постоянной длительности обслуживания в моделях $M/M/m/\infty$ и $M/D/m/\infty$:

$$P_{w>0} = \frac{C_m(\Lambda)}{2 \cdot 2^0 \left(\frac{m}{m+\Lambda} \right)^1}, \quad (2)$$

где $P_{w>0}$ – вероятность ожидания при постоянной, а $C_m(\Lambda)$ – при экспонентной длительности обслуживания. Так как $P_{w>0} = W / t_q$, то из (1) и (2) длительность ожидания требований в очереди $t_{q(D)}$ при постоянном обслуживании равна:

$$t_{q(D)} = \frac{W_{(D)}}{P_{w>0}} = \frac{1}{m-\Lambda} \cdot 2^2 \left(\frac{m}{m+\Lambda} \right)^3. \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) видно, что одноименные характеристики QoS в моделях $M/M/m/\infty$ и $M/D/m/\infty$ при экспонентной и постоянной длительности обслуживания связаны между собой следующей аппроксимирующей функцией:

$$F(k) = 2^{k-1} \left(\frac{m}{m+\Lambda} \right)^k, \quad (4)$$

где $k = 1, 2$ и 3 для характеристик $P_{w>0}$, $W_{(D)}$ и $t_{q(D)}$ соответственно. Итак, аппроксимирующая функция (4) позволяет определить характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ через C -формулу Эрланга;

$$P_{w>0} = \frac{C_m(\Lambda)}{2 \cdot F(k)}, \quad W_{(D)} = \frac{C_m(\Lambda)}{m-\Lambda} \cdot F(k+1), \quad t_{q(D)} = \frac{F(k+2)}{m-\Lambda}.$$

При синтезе пакетных сетей есть проблема расчета пропускной способности сетей широкополосного мультисервисного доступа. Типовая структура кластера сети доступа предусматривает каскадное включение узлов доступа (УД) и возможность взаимной связи абонентов кластера. Она содержит, транзитный узел доступа УД₁ и каскадно подключенные через него УД₂...УД_{*m*}. Узлами доступа есть мультиплексоры *xDSL* (*DSLAM*), базовые станции *WiMAX* и/или *WiFi* и прочее оборудование.

Трафик в кластерах из-за небольшого количества абонентов (до 300) описывается моделью примитивного потока (пуассоновского потока второго рода). Для него распределение интервалов между требованиями тоже экспоненциально, но параметр λ пропорционален количеству свободных источников трафика. Состояние системы распределено по усеченному закону Бернулли и потому модель потока обозначен как M_B .

Состояния последовательно соединенных УД зависимы, так как потоки требований занимают в них определенную часть пропускной способности. Для получения точных результатов необходимо рассчитывать каждый автономный сегмент сети доступа с каскадным включением УД (кластер) в целом, не деля его на отдельные УД.

Обозначим: $N_1, N_2 \dots N_m$ – емкости соответствующих узлов доступа; $R_1 \dots R_m$ – скорости передачи для УД₁...УД_m; R – общая скорость передачи в направлении к транспортной сети от всех узлов доступа кластера; $v_1 \dots v_m$ – расчетное количество условных каналов для УД₁...УД_m; V – расчетное количество условных каналов для направления к транспортной сети; α_1, α_2 – интенсивность абонента в свободном состоянии внутри кластера и к транспортной сети.

Обозначим $P(k_1, l_1; \dots; k_m, l_m)$ – вероятность наличия в УД₁...УД_m соответственно $k_1 \dots k_m$ соединений внутри кластера и $l_1 \dots l_m$ соединений к транспортной сети. Для i -го УД вероятность наличия $k_i + l_i$ соединений равна:

$$\tilde{N}_{N_i}^{l_i} \alpha_2^{l_i} C_{N_i - l_i}^{k_i} \alpha_1^{k_i} p_0, \quad (5)$$

где p_0 – вероятность отсутствия соединений.

Для симметричного кластера $N_i = N$ и $v_i = v$. Для всех i ($0 \leq i \leq m$) введены множества состояний кластера, в каждом из которых все состояния равновероятны. Обозначим i_{kl} – количество УД, имеющих по k соединений внутри кластера и по l соединений к транспортной сети. Для отдельно взятого УД вероятность наличия $k + l$ соединений определяется (5). Вероятность того, что из всех УД i_{00} имеют по $k = 0$ и $l = 0$ соединений, i_{01} – по $k = 0$ и $l = 1$ соединений и т. д.:

$$P(i_{00}, i_{01}, \dots, i_{v0}) = \frac{m!}{\prod_{k=0}^{v-l} \prod_{l=0}^v i_{kl}!} \prod_{l=0}^v \prod_{k=0}^{v-l} (C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k)^{i_{kl}} \times P_0.$$

Вероятности макросостояний кластера доступа описываются полиномиальным распределением. Вероятность наличия j соединений ($0 \leq j \leq V$) от всех m УД в общем направлении $P_j = \sum_j P(i_{00}, i_{01}, \dots, i_{v0}) = B_j(m) P_0$. Представим ее про-

изведением вероятности наличия l соединений от определенного УД на вероятность наличия $j - l$ соединений от других $(m - 1)$ УД и потому имеет место рекуррентное соотношение:

$$B_j(m) = \sum_{l=0}^v \sum_{k=0}^{v-l} C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k B_{j-l}(m-1). \quad (6)$$

Из (6) получено второе рекуррентное соотношение:

$$\begin{aligned} j B_j(m) &= \sum_j m \sum_{s=0}^v \sum_{r=0}^{v-s} s \frac{i_{rs}(m-1)!}{\prod_{k=0}^{v-l} \prod_{l=0}^v i_{kl}!} \prod_{l=0}^v \prod_{k=0}^{v-l} (C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k)^{i_{kl}} = \\ &= m \sum_{s=1}^v \sum_{r=0}^{v-s} s C_N^s \alpha_2^s C_{N-s}^r \alpha_1^r B_{j-s}(m-1). \end{aligned}$$

которое после преобразований представлено так:

$$j B_j(m) = m N \alpha_2 \sum_{s=1}^v C_{N-1}^{s-1} \alpha_2^{s-1} B_{j-s}(m-1) \sum_{r=0}^{v-s} C_{N-s}^r \alpha_1^r.$$

Поскольку $\tilde{N}_{N-1}^s C_{N-s-1}^{v-s} = C_{N-1}^v C_v^s$, то более удобным есть соотношение:

$$jB_j(m) = \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_1} [(mN + j + 1)B_{j-1}(m) - mNC_{N-1}^v \sum_{l=0}^v C_v^l \alpha_2^l \alpha_1^{v-l} B_{j-1-l}(m-1)]. \quad (7)$$

С учетом формулы Энгсета последовательно определяются все значения $B_j(m)$, по которым рассчитываются характеристики QoS в кластере. Обозначим: P_i – вероятность занятости i условных каналов для рассмотренного УД при связи внутри кластера; Π_j – вероятность занятости j условных каналов в направлении к транспортной сети; P_{ij} – вероятность одновременной занятости i условных каналов для рассмотренного УД при связи внутри кластера и j условных каналов в направлении к транспортной сети. Характеристики QoS такие:

$$P_i = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} \sum_{j=0}^{V-l} B_j(m-1)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}, \quad \dot{P}_j = \frac{B_j(m)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}, \quad P_{ij} = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} B_{j-l}(m-1)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}.$$

Вероятность потери требования P_B – это отношение интенсивности потоков потерянных и входных требований. Для УД интенсивность потоков требований внутри кластера λ_κ и внешнего λ_ε соответственно равны:

$$\lambda_\varepsilon = \sum_{i=0}^v \alpha_1 (N - i) P_i, \quad \lambda_{\hat{a}} = \sum_{i=0}^v \alpha_2 (N - i) P_i.$$

Потери P_B для связи внутри кластера и для внешней связи соответственно:

$$P_{B\hat{e}} = \frac{\alpha_1 (N - v) P_v}{\lambda_\varepsilon}, \quad P_{B\hat{a}} = \frac{\alpha_2 (N - v) P_v + \sum_{i=0}^{v-1} \alpha_2 (N - i) P_i}{\lambda_\varepsilon}.$$

По (7) рассчитываются потери требований и соответствующая им пропускная способность сети мультисервисного доступа. Синтез сети сводится к определению количества условных каналов так, чтобы не превышались нормативные потери требований, а потом для каждого такого канала определяется скорость передачи так, чтобы не превышались нормы потерь пакетов, после чего находится необходимая полоса в Мбит/с каждого направления связи.

Результаты исследований раздела 3 изданы в работах [1, 10, 16, 17, 42].

В четвертом разделе – „Методы анализа и синтеза систем распределения информации в условиях неоднородного трафика” – рассмотрены параметры мультисервисного трафика, определена функция распределения стационарных вероятностей состояний системы $HM/D/m$. На основе этой функции разработан метод расчета вероятности потерь P_B и предложена аппроксимация для расчета вероятности P_B для произвольного закона распределения длительности обслуживания (модель $HM/G/m$). Для модели с очередью $HM/D/m/\infty$ разработан новый итерационный метод расчета характеристик качества обслуживания.

Определение характеристик QoS основывается на вероятностной функции распределения состояний системы P_j , где состояние системы – это текущее количество занятых серверов j или требований в системе. В модели $HM/D/\infty$ требования обслуживаются без потерь и потому при постоянной длительности сервиса t свойства потока освобождений серверов совпадают со свойствами по-

тока поступления требований, так как имеет место только сдвиг во времени на величину t между моментом поступления требования и моментом его выхода из системы. Состояния системы определяются свойствами потока требований, а вероятностные функции распределения количества требований в системе j и количества поступивших требований i за время t , совпадают. При нормальном распределении числа поступивших требований функция P_i определит функцию состояний P_j :

$$P_i = P_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(i-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}. \quad (8)$$

При ограниченном до m количестве серверов пространство состояний системы также ограничено от 0 до m . В модели $M/D/m$ вероятностная функция распределения состояний системы аппроксимируется усеченным нормальным законом, определяющим вероятности состояний системы P_j в диапазоне $0 \leq j \leq m$:

$$P_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{\int_0^{m-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt - \int_0^{0-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_0^{m-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt - \int_0^{0-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt} \right]^{-1} e^{-\frac{(j-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}. \quad (9)$$

При $m = \infty$ значения (8) и (9) совпадают. На рис. 1 приведены графики аппроксимации распределения состояний системы с $m = 130$ и 150 при $\Lambda = 100$ Эрл, $\sigma^2 = 400$, т. е. пик-фактор $S = \sigma^2 / \Lambda = 4$.

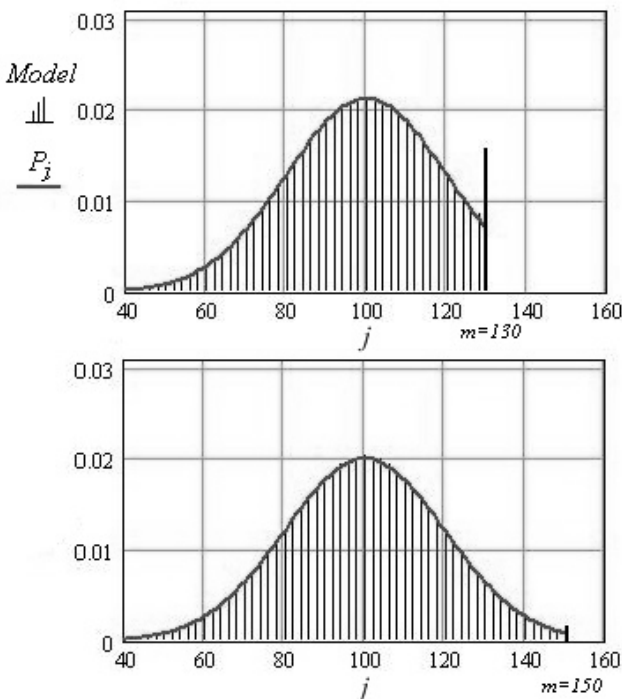


Рис. 1. Аппроксимация состояний

Имитационным моделированием подтверждена адекватность аппроксимации усеченным нормальным законом и при любых Λ , σ^2 и m относительная погрешность не превышает 1% для всех значений P_j , кроме $P_{j=m}$. Процесс обслуживания требований в системе является эргодическим или не зависит от начального состояния системы при условии $m > \Lambda$. Если m существенно превышает Λ , то начальное состояние системы не сильно влияет на функцию распределения состояний системы. При уменьшении m начальное состояние проявляет свое наибольшее влияние именно на вероятность $P_{j=m}$. Это происходит из-за „скупенности” реального трафика, ибо $\sigma^2 > \Lambda$. В случаях занятости всех серверов, при освобождении любого

из них, сервер тут же занимается очередным требованием, поступающим сейчас в систему из-за скупенности требований на данном интервале времени, а это поддерживает систему более продолжительное время в состоянии „насыщения”, т. е. в состоянии $P_{j=m}$ и данная вероятность увеличивается.

При $\sigma^2 = \Lambda$ законы Гаусса и Пуассона почти совпадают уже при $\Lambda > 20$. Поэтому усеченное нормальное распределение (9) дает значения вероятностей состояний системы, которые с такой же точностью совпадают со значениями, получаемым по принятому для этого случая распределению Эрланга.

Вероятность занятости всех серверов системы $P_{j=m}$ определяет долю времени, в течение которого есть потенциальная возможность потери требования. Для пуассоновского потока, где $\sigma^2 = \Lambda$ и $S = 1$, вероятность $P_{j=m}$ совпадает с вероятностью потери требования P_B . При гиперэкспонентном потоке, где $\sigma^2 > \Lambda$, с учетом этого выходит, что вероятность потери требования P_B больше вероятности занятости всех серверов системы $P_{j=m}$ в S раз, т. е. пропорционально коэффициенту S . Таким образом, вероятность потери требования P_B определится путем умножения (9) для состояния $j = m$ на S и окончательно получаем:

$$P_B = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(m-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\Lambda}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt} \frac{\sigma^2}{\Lambda}. \quad (10)$$

Значения плотности нормального распределения и функции Лапласа (интеграл вероятности), используемые в числителе и знаменателе формулы (10) соответственно, широко приведены в математических справочниках.

Графики зависимости вероятности потерь требований от емкости системы и коэффициента скупенности S приведены на рис. 2. Все графики соответствуют интенсивности нагрузки $\Lambda = 100$ Эрл. Пунктирная кривая $E_m(\Lambda)$ подает зависимость вероятности потерь от m , рассчитанной по формуле Эрланга.

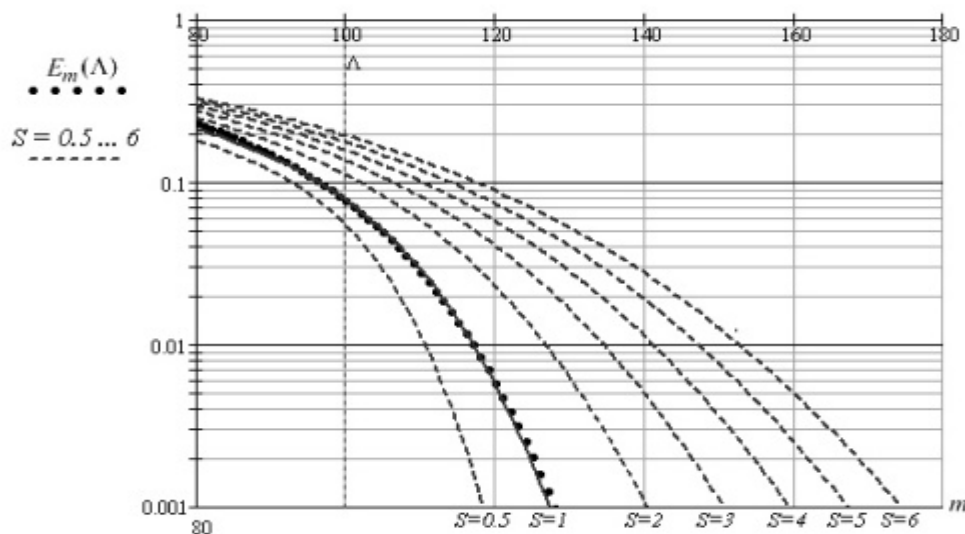


Рис. 2. Зависимость вероятности P_B от m и коэффициента S

Из рисунка видно, что графики вероятностей, рассчитанных по B -формуле Эрланга и формуле (10) при $S = 1$, совпадают (расхождение до 5 %). При $S < 1$ (выровненный поток) вероятность потерь требований уменьшается. При увеличении коэффициента S вероятность потерь для равной емкости системы возрастает, на что указывают графики для $S = 2, \dots, 6$ (штриховые линии).

По распределению Эрланга находятся состояния системы типа $M/G/m$ с экспонентным распределением интервала времени между требованиями потока ($S = 1$). Гиперэкспонентное распределение порядка $n = 1$ оборачивается в экспонентное и потому оно является его обобщением. Но в отличие от распределения Эрланга, истинного для любого (G) закона распределения длительности обслуживания, нормальное усеченное распределение состояний системы при $S > 1$ справедливо только для модели $HM/D/m$, т. е. при постоянной длительности обслуживания. Для других законов распределения длительности обслуживания требований в формулу (10) введен соответствующий множитель, где коэффициент k учитывает вид закона распределения этой длительности.

Установлено, что при $S > 1$ регулярный закон распределения длительности обслуживания является наилучшим и потому (10) является верхней границей значений вероятности потерь требований при обслуживании мультисервисного трафика. При этом качество обслуживания требований возрастает или вероятность потерь требований уменьшается в том случае, когда в законе распределения длительности сервиса присутствует большая часть (вероятность) менее коротких по длительности требований. Короткие требования быстрее уходят из системы и, таким образом, ее пропускная способность возрастает.

При расчете вероятности потерь требований для учета вида закона распределения длительности обслуживания из (10) получена следующая формула:

$$P_B = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(m-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\Lambda}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt} \frac{\sigma^2}{\Lambda} \left[1 - \frac{(S^2 - 1)(\sigma - \Lambda + m)}{\sigma(kS^2 - k + 5)} \right], \quad (11)$$

где k – коэффициент, равный 16,45; 4,25; 3,55; 2,85 и 2,32 для регулярного, равномерного, экспонентного, логарифмически нормального и гиперэкспонентного законов распределения соответственно. Формула (11) дает расхождение с данными имитационного моделирования не более $\pm 5\%$.

В телекоммуникационных системах и сетях потоки требований могут обрабатываться не только по дисциплине обслуживания с явными потерями, но и способом с ожиданием, как в сетях ATM или IP . При неоднородном трафике (гиперэкспонентный поток требований) СРИ, применяемые в этих сетях, могут быть представлены моделью $HM/D/m/\infty$ – полностью доступная система на m серверов с неограниченным числом мест ожидания в очереди. Характеристики QoS :

- вероятность ожидания $P_{w>0}$;
- средняя продолжительность ожидания требований в очереди t_q ;
- средняя продолжительность ожидания требований в системе W ;

– средняя длина очереди Q .

Эти характеристики нужно рассчитывать именно в такой последовательности, поскольку последние две однозначно определяются двумя первыми:

$$W = t_q P_{w>0}, \quad (12)$$

$$Q = \Lambda W. \quad (13)$$

Выражение (12) вытекает из того, что средняя продолжительность ожидания для любого требования W (ожидающего и нет) есть средним значения времени ожидания, отнесенным к всем требованиям. Если же известная средняя длительность ожидания только задержанных требований t_q , то, естественно, для определения W надо помножить эту длительность на вероятность $P_{w>0}$, которая показывает среднюю долю задержанных требований.

Выражение (13) соответствует формуле Дж. Литтла – за W единиц времени ожидания в очередь поступит ΛW требований.

Значительно сложнее рассчитать $P_{w>0}$ и t_q . Эти характеристики могут быть определены из функций распределения состояний системы P_j и распределения времени ожидания начала обслуживания $P(t_q)$. Однако не существует общего метода получения таких функций, и выражения для них не являются обычно простыми и явными формулами.

Для расчета t_q используем следующие известные результаты:

- из C -формулы Эрланга вытекает, что в системе $M/M/m/\infty$ средняя длительность ожидания для задержанных требований $t_{q(M)} = 1 / (m - \Lambda)$;
- из формулы Поллачека-Хинчина вытекает, что в системе $M/D/1/\infty$ средняя длительность ожидания для задержанных требований $t_{q(D)} = t_{q(M)} / 2$.

Очевидно, что в искомом выражении для расчета t_q системы $HM/D/m/\infty$ должны учитываться данные результаты. Первый – потому, что пуассоновский поток (M) есть частным случаем гиперэкспонентного (HM). Второй – потому, что односерверная система ($m = 1$) является частным случаем многосерверной.

Для системы $HM/D/m/\infty$ показано, что t_q больше $t_{q(M)}$ в $S / 2$ раз при $m = \Lambda$. Данный факт хорошо согласовывается с приведенными известными соотношениями – учтено и отличие гиперэкспонентного потока от пуассоновского через пик-фактор S , и отличие в два раза средней длительности ожидания при постоянной и экспонентной длительности обслуживания, но отнесено это к характерной точке $m = \Lambda$ ($m > \Lambda$ – условие эргодичности процесса).

С ростом емкости системы m коэффициент $k = 2$ убывает приблизительно со скоростью $k(m) \approx (m + \Lambda) / m$. Установлено, что точность расчета t_q повышается при замене данной зависимости на $k(m) \approx (m + \Lambda + 1 + \Lambda / m) / m$. Окончательное выражение для расчета t_q системы $HM/D/m/\infty$ имеет вид:

$$t_q = \left(\frac{S}{m - \Lambda} \right) \frac{m}{m + \Lambda + 1 + \Lambda / m} = \frac{S}{(m + 1) \left[1 - (\Lambda / m)^2 \right]}. \quad (14)$$

Для расчета $P_{w>0}$ применим такие доводы. Вероятность ожидания $P_{w>0}$ равна вероятности того, что требование, которое только поступило, застает все m серверов системы занятыми:

$$P_{w>0} = \sum_{j=m}^{\infty} P_j = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} P_j. \quad (15)$$

где j – состояние системы ($0 \leq j \leq m$ – серверы, $m < j \leq \infty$ – очередь).

Известно, что в модели $HM/D/\infty$ при неограниченном количестве серверов требования обслуживаются без потерь. При этом при постоянной длительности обслуживания t свойства потока освобождений серверов совпадают со свойствами потока поступления требований и потому состояния системы определяются свойствами входного потока требований, а функции распределения количества требований в системе P_j и поступающего количества требований P_i за время t совпадают, что показано в формуле (8).

При конечном количестве серверов m и неограниченном количестве мест ожидания требования также обслуживаются без явных потерь. Однако в этом случае требования, поступившие после занятия всех серверов системы, попадают в очередь на ожидание, и в случае освобождения хотя бы одного из m занятых серверов сразу же подаются из очереди на обслуживание. Теперь на серверы системы поступают требования из первичного потока с интенсивностью Λ и из очереди с интенсивностью $\Lambda P_{w>0} t_q$, поскольку требования, ожидающие в очереди, образуют дополнительный поток с интенсивностью $\Lambda P_{w>0}$ и каждое из этих требований ожидает в очереди среднее время t_q . Поэтому общая интенсивность нагрузки на серверы увеличивается до величины $\Lambda_2 = \Lambda + Q$, так как в соответствии с (12) $P_{w>0} t_q$ есть средняя продолжительность ожидания W , а в соответствии с (13) – $\Lambda \cdot W$ есть средняя длина очереди Q .

В этих условиях функция распределения количества требований в системе (на обслуживании и в очереди) или состояний системы P_j отличается от функции распределения количества поступивших требований, P_i . На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования в виде распределений состояний системы при гиперэкспонентном потоке требований, поступающего в систему с параметрами $\Lambda = 100$ Эрл и $S = 4$ при $m = 105, 110$ и 120 серверов. Для исключения бесконечной очереди обязательно может быть $m > \Lambda$.

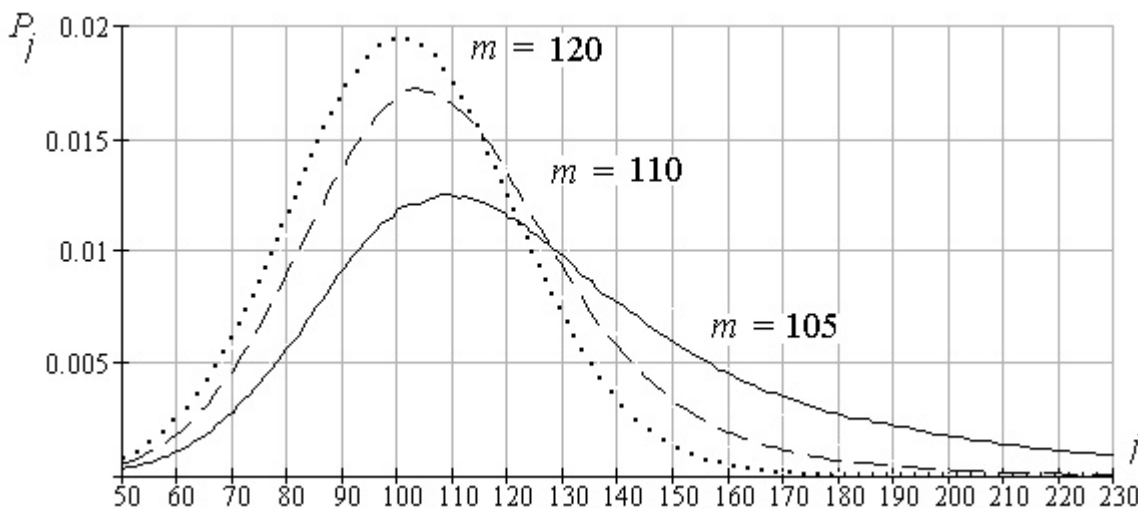


Рис. 3. Распределение состояний системы $HM/D/m/\infty$

Из рисунка видно, что уже при $m = 120$ (пунктирная линия) функция рас-

пределения состояний системы почти симметрична, а это позволяет аппроксимировать ее нормальным законом распределения.

Приведенные графики демонстрируют, что при уменьшении емкости системы m разброс отдельных значений функции распределения состояний системы от среднего или математического ожидания увеличивается. Из чего вытекает, что дополнительный поток требований из очереди не только увеличивает общую интенсивность нагрузки Λ_2 , но и ее дисперсию σ^2 . На рис. 4 для данного примера выполнена аппроксимация состояний системы нормальным законом распределения с параметрами $\Lambda_2 = \Lambda + Q$ и $\sigma_2 \approx \sigma + Q/2$ на участке, обусловленном границами суммирования в формуле (15), то есть от 0 до $(m - 1)$.

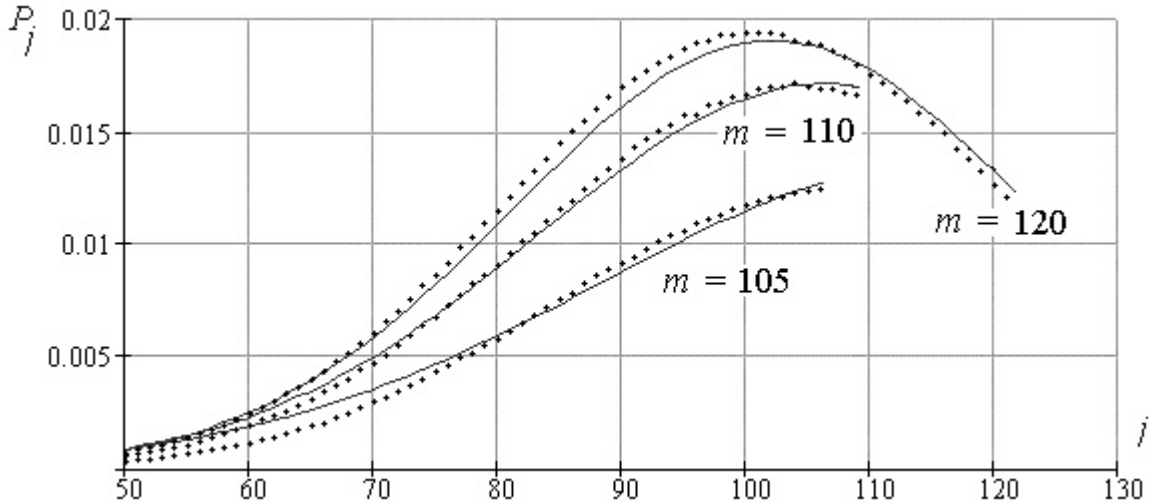


Рис. 4. Аппроксимация функций распределения состояний системы

Графики, представленные на рис. 4. подтверждают высокую точность аппроксимации функции распределения состояний системы P_j (пунктирная линия) нормальным законом распределения (непрерывная линия) с параметрами:

$$\Lambda_2 = \Lambda + Q, \quad (16)$$

$$\sigma_2 \approx \sigma + Q/2. \quad (17)$$

Из приведенного вытекает простой итерационный алгоритм расчета характеристик качества обслуживания системы $HM/D/m/\infty$:

- в соответствии с (14) по заданным параметрам потока требований Λ и S для емкости системы m определяется t_q ;
- в соответствии с (15) и (8) по параметрам Λ и σ^2 предварительно определяется вероятность ожидания $P_{w>0}$;
- по найденным значениям t_q и $P_{w>0}$ в соответствии с (12) и (13) определяются первоначальные значения W и Q ;
- по найденным в соответствии с (16) и (17) значением Λ_2 и σ_2 по формулам (15) и (8) определяется уточненная вероятность $P_{w>0}$, т. е. с учетом влияния дополнительной нагрузки на серверы системы из очереди;
- по уточненному значению вероятности $P_{w>0}$ в соответствии с (12) и (13) уточняются значения W и Q .

Установлено, что реализация предложенного алгоритма в большом диапазоне варьирования параметров Λ , S и m дает всегда несколько заниженную

оценку вероятности ожидания $P_{w>0}$, однако при этом относительная погрешность никогда не превышает 10%. Очевидно, что на величину ошибки влияет приближенная оценка (17) среднеквадратичного отклонения σ_2 . Кроме того, соответственно описанному алгоритму на последнем шаге снова уточняются значения W и Q , и потому целесообразно еще раз пересчитать $P_{w>0}$ с более точными значениями Λ_3 и σ_3 . Как показало моделирование, даже при таком подходе к определению σ (см. 17), результаты расчетов после третьей итерации всегда дают верхнюю оценку вероятности ожидания $P_{w>0}$, не превышающую 10%.

Для приведенного на рис. 3 и 4 примера модели по предложенному алгоритму выполнены расчеты и моделирование, а результаты сведены в табл. 1. Здесь W и t_q представлены в единицах средней длительности обслуживания.

Таблица 1

Результаты имитационного моделирования

Параметр QoS	Модель	1-я итерация		2-я итерация		3-я итерация	
		расчет	погрешность	расчет	погрешность	расчет	погрешность
$m = 105$							
$P_{w>0}$	0,71332	0,41050	-42,6%	0,66514	-6,8%	0,74821	4,9%
Q	28, 89636	16,67339	-42,3%	27,01616	-6,5%	30,39005	5,2%
W	0, 28908	0,16681	-42,3%	0,27029	-6,5%	0,30404	5,2%
t_q	0,40526	0,40636	0,3%	0,40636	0,3%	0,40636	0,3%
$m = 120$							
$P_{w>0}$	0,21076	0,16674	-20,5%	0,19941	-5,4%	0,21080	0,0%
Q	2,26827	1,82124	-18,9%	2,18245	-3,8%	2,30356	1,6%
W	0,02264	0,01819	-18,9%	0,02178	-3,8%	0,02300	1,6%
t_q	0,10742	0,10910	1,6%	0,10910	1,6%	0,10910	1,6%

Как видно из табл. 1 относительная погрешность расчета Q и W определяется суммарной точностью расчета t_q и $P_{w>0}$, и вместе с тем погрешность расчета всех характеристик QoS остается в пределах $\pm 10\%$ (вторая и третья итерации). Расчеты, выполненные для данного примера методом Кроммелина, дают занижение результата от 50 до 95% (с ростом m увеличивается погрешность).

Результаты исследований, приведенные в разделе 4, опубликованы в работах автора [1, 2, 4-6, 8, 9, 25, 28, 31, 43, 44,].

В пятом разделе – „Оценка характеристик качества обслуживания в условиях самоподобного и произвольного трафика” – проанализированы методы расчета трафика пакетных сетей связи; разработан энтропийный метод расчета характеристик качества обслуживания самоподобного трафика в модели $fBM/G/1/\infty$; предложены методы оценки характеристик QoS моделей $G/M/1/\infty$ и $G/D/1/\infty$; для модели $GI/G/1/\infty$ установлены все функциональные соотношения между характеристиками QoS .

Оценка характеристик качества обслуживания в СРИ при условии самоподобного трафика (fBM) – очень сложная математическая задача. Для одно-

серверной системы с бесконечной очередью и постоянным временем обслуживания (модель $fBM/D/1/\infty$) есть приближенное решение – формула Норроса, по которой определяется среднее количество требований в системе N . Однако анализ этой формулы показывает, что при значениях коэффициента Херста $H = 0,5$ получаем известный результат для среднего количества требований в системе типа $M/M/1/\infty$, что противоречит начальным условиям вывода формулы – продолжительность обслуживания есть константа, то есть имеет регулярное распределение. Кроме того, имитационным моделированием этот результат не подтверждается, поскольку иногда дает погрешность в сотни процентов.

Случайный процесс (СП) поступления пакетов в СРИ на обслуживание, образует поток пакетов (трафик). Он характеризуется законом распределения, устанавливающим связь между значением случайной величины (количеством пакетов) и вероятностью появления этого значения. В большинстве случаев для расчета параметров QoS достаточно знать о законе распределения только некоторые его числовые характеристики – моменты распределения разных порядков. Однако иногда их недостаточно для прогнозирования значения случайной величины. Например, СП может характеризоваться одинаковыми значениями Λ и D_Λ , но внутренняя структура этих процессов разная. Одни могут иметь плавно меняющиеся реализации, а другие – выраженную колебательную структуру при скачкообразном изменении отдельных значений случайной величины (резкое возрастание числа пакетов в сети, называемое „пачечностью” трафика). Для „плавных” процессов характерна большая предсказуемость реализаций, а для „пачечных” – очень малая вероятностная зависимость между двумя случайными величинами СП. В таких случаях закон распределения, характеризующий СП, несет в себе некоторую неопределенность и позволяет с большей или меньшей надежностью прогнозировать значение случайной величины. Поэтому используемые вероятностные законы распределения, описывающие трафик в пакетных сетях, не дают такой количественной оценки неопределенности состояния СМО как энтропия распределения $H_e = -\sum_{i=1}^m p_i \log p_i$. Энтропия не зависит от значений случайной величины, а только от их вероятностей.

Для оценки параметров качества обслуживания самоподобного трафика разработан энтропийный метод, сводящийся к использованию методов расчета известных распределений, энтропия которых совпадает или наиболее близка к энтропии состояний системы при обслуживании самоподобного трафика.

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования системы $fBM/G/1/\infty$. В данном случае самоподобный трафик, сформированный по распределению Парето таким, чтобы коэффициент Херста составлял $H = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,85$ и $0,9$. При изменении величины загрузки системы ρ от $0,3$ до $0,9$ (наиболее реальный режим работы) измеряется энтропия распределения состояний системы (показано пунктирными линиями для указанных значений H сверху вниз соответственно). Непрерывными линиями показана рассчитанная энтропия H_e функции распределения состояний системы для известных моделей $M/D/1/\infty$, $M/M/1/\infty$ и два графика для модели $M/Log/1/\infty$ (сверху вниз

соответственно). Для данных моделей коэффициент вариации длительности обслуживания $C \equiv 0$, $C \equiv 1$, $C = 2$ и $C = 8$ соответственно.

Из рис. 5 видно, что графики энтропии модели с самоподобным трафиком пересекаются с графиками рассчитанной энтропии функции распределения состояний системы для известной модели $M/G/1/\infty$. Изменяя коэффициент вариации C этой модели можно „накрыть” всю область возможных значений энтропии состояний системы с самоподобным трафиком при любых значениях H и ρ .

Установлено, что в тех точках, где одинакова энтропия распределения состояний системы, одинаковы или близки и исследуемые параметры QoS , такие как: среднее количество требований в системе N , средняя длина очереди Q и средняя длительность ожидания требований в системе W . Например, для моделей $M/D/1/\infty$ и $fBM/D/1/\infty$ при коэффициенте Херста $H = 0,7$ и $\rho = 0,7$ энтропии функции распределения состояний системы равны $-1,66$ и $-1,70$ соответственно. При этом для модели $fBM/D/1/\infty$ $N = 1,62$, а для модели $M/D/1/\infty$ $N = 1,52$. Такое же совпадение характеристик QoS наблюдается во всех других точках, для которых близки значения энтропии распределения состояний системы, независимо от закона распределения длительности обслуживания. Поэтому для расчетов можно применять формулу Поллачека-Хинчина модели $M/G/1/\infty$.

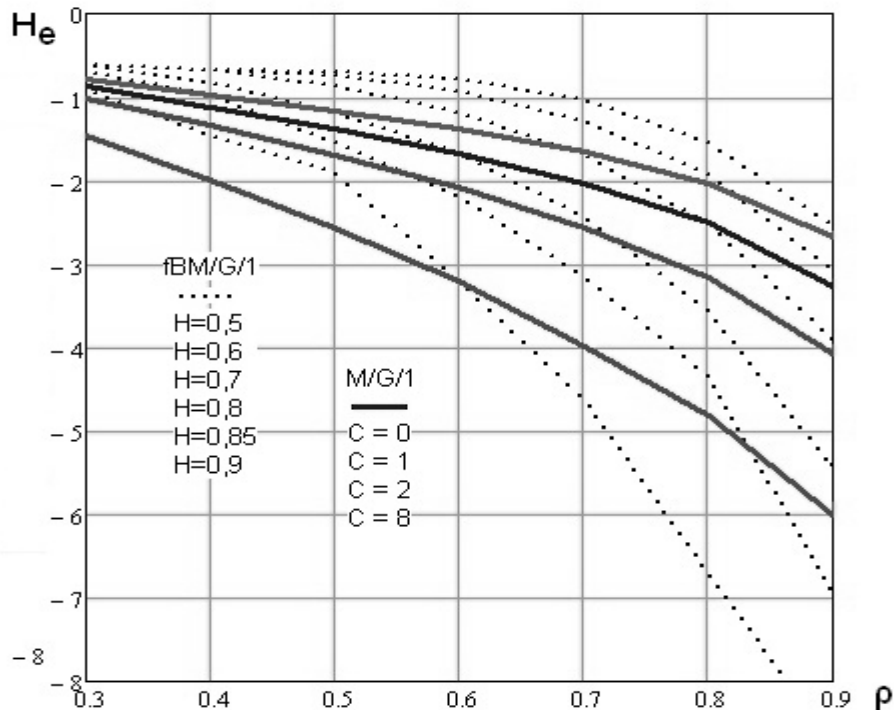


Рис. 5. Зависимость энтропии распределения состояний системы H_e от ρ

Алгоритм энтропийного метода расчета характеристик QoS такой:

- для установленного закона распределения состояний системы $fBM/G/1/\infty$ по известным формулам находим энтропию распределения H_{fBM} ;
- изменением коэффициента вариации C для модели $M/G/1/\infty$, например $M/HM/1/\infty$, достигается совпадение значений энтропии $H_{M/HM/1} = H_{fBM/G/1}$;
- с помощью найденного коэффициента вариации C определяется среднее количество требований в системе N по формуле Поллачека-Хинчина;

– по известным соотношениям определяем другие характеристики QoS .

Таким образом, расчет параметров QoS в модели с самоподобным трафиком при любом законе распределения длительности обслуживания осуществим. Необходимым условием такого расчета есть определение энтропии распределения состояний системы. Метод на порядок более точен, чем применяемая формула Норроса для модели $fBM/D/1/\infty$. Однако невозможно рассчитать вероятность ожидания $P_{w>0}$, поскольку она не равна ρ , как при пуассоновском потоке.

В пакетных сетях связи входные информационные потоки могут иметь постоянную, переменную и смешанную битовую скорость, и потому математическая модель потока изменяется от простейшей пуассоновской до сложнейшей модели фрактальных процессов (самоподобный трафик). Поэтому резонно исследовать произвольный закон (обобщенный, G) распределения случайной величины интервала времени между требованиями в этих потоках.

Для любой односерверной системы $\rho = 1 - p_0$, где p_0 – вероятность свободности системы (состояние p_0 – заняты 0 серверов). Итак, ρ – численно совпадает с вероятностью занятости системы P_{3H} (состояние системы p_1 – занятый единый сервер, соответствует доле времени занятости сервера). С учетом еще и требований, находящихся в очереди, в стационарном режиме существует распределение количества требований в системе (сервер и очередь) p_k , где k – количество требований, не зависящее от момента прибытия требования в систему.

При пуассоновском потоке вероятность ожидания $P_{w>0}$ совпадает с вероятностью занятости системы P_{3H} . Для односерверной модели $M/G/1/\infty$ с произвольным распределением длительности обслуживания $P_{w>0} = \rho$. Однако, для модели $G/M/1/\infty$ такого равенства нет, т. е. по этим параметрам модели не инвариантны. Показано, что система $G/M/1/\infty$ приводит к геометрическому распределению количества требований в системе в моменты поступления новых требований r_k . Распределение p_k отличается от распределения r_k тем, что $p_0 = 1 - P_{3H}$ (или $p_0 = 1 - \rho$), а $r_0 = 1 - P_{w>0}$. Для системы $M/G/1/\infty$ выполняется: $p_k = r_k$.

Требование должно ожидать обслуживания с вероятностью $P_{w>0} = 1 - r_0$. Поэтому, при экспонентном распределении длительности обслуживания безусловное распределение продолжительности ожидания определится так:

$$W(t) = 1 - P_{w>0} e^{-\mu(1-P_{w>0})t}.$$

Из этого рассчитываем среднее время ожидания в системе $W = \frac{D_{w>0}}{1 - D_{w>0}}$, а

затем и все другие параметры QoS . Для модели $G/M/1/\infty$ установлены два свойства односерверной системы при экспонентной длительности обслуживания. Во-первых, среднее время ожидания в очереди t_q численно совпадает со средним временем пребывания требования в системе T . Это означает, что среднее время ожидания в системе W меньше среднего времени ожидания в очереди t_q на величину средней продолжительности обслуживания, т. е. $W = t_q - 1$. Во-вторых, вероятность ожидания можно определить как $P_{w>0} = Q / N$.

Для приближенного расчета характеристик QoS модели $G/D/1/\infty$ использовано выявленное свойство модели $G/M/1/\infty$, а именно: $t_q = T$. Поскольку из определения среднего времени пребывания требования в любой системе (в том

числе и в модели $G/G/1/\infty$) вытекает, что $T = W + 1$, то для модели $G/M/1/\infty$ будет $t_q - W = 1$. Из табл. 2. видно, что при выполнении этого, каждая из формул расчета характеристик QoS модели $G/G/1/\infty$ совпадает с аналогичной формулой модели $G/M/1/\infty$. Для модели $M/D/1/\infty$ величина $t_q - W = 0,5$. Поэтому при выполнении этого вместе с условием $P_{w>0} = \rho$ (при пуассоновском потоке), каждая из формул модели $G/G/1/\infty$ превратится в соответствующую формулу модели $M/D/1/\infty$ (табл. 2). При $P_{w>0} \neq \rho$ из тех же формул модели $G/G/1/\infty$ получены соответствующие формулы расчета характеристик QoS модели $G/D/1/\infty$. Но для этой модели различие t_q и W не всегда дает 0,5 – бывает больше или меньше этого значения, что несколько снижает точность расчета в этих случаях.

Таким образом, для модели с очередью $G/G/1/\infty$ установлены функциональные соотношения между всеми характеристиками QoS , позволяющие рассчитывать любую из характеристик QoS при приближенной оценке хотя бы одной из них. Эта модель есть обобщением всех других односерверных моделей.

Таблица 2

Функциональные соотношения между характеристиками QoS

Параметр QoS	Модель СРИ			
	$M/D/1/\infty$	$G/M/1/\infty$	$G/G/1/\infty$	$G^*/D/1/\infty$
$P_{3н}$	ρ	ρ	$\rho, \frac{Q}{t_q P_{w>0}}$	
$P_{w>0}$	ρ	$1 - \frac{\rho}{N}$	$\frac{W}{t_q}, \frac{Q}{t_q \rho}$	
Q	$\frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$	$\frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{\rho P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$
W	$\frac{\rho}{2(1-\rho)}$	$\frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$
t_q	$\frac{1}{2(1-\rho)}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{1}{2(1 - P_{w>0})}$
N	$\rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$	$\frac{\rho}{1 - P_{w>0}}$	$\rho + \frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{\rho(2 - P_{w>0})}{2(1 - P_{w>0})}$
T	$1 + \frac{\rho}{2(1-\rho)}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}}$	$1 + \frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{2 - P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$

Результаты исследований, приведенные в разделе 5, опубликованы в работах автора [13-15, 17, 19, 21, 23].

В шестом разделе – „Анализ и синтез сетей подвижной связи и сигнализации” – разработан метод расчета качества обслуживания абонентов сети подвижной связи и метод оценки эффективности использования каналов сигнализации ОКС №7 на транспортном уровне эталонной модели OSI.

Синтез сетей мобильной связи, требующий в итоге определения структуры, состава и объема оборудования, состоит из нескольких этапов. На этапе частотного планирования определяются размеры кластеров, мощности передатчиков, высота антенн, количество секторов каждой базовой станции. Наиболее сложная задача – это определение мест установки базовых станций, количества и радиусов сот, а также количества задействованных радиоканалов для каждой соты. Исходные данные на этом этапе – это прогнозируемое количество мобильных абонентов (МА), ожидаемая удельная интенсивность нагрузки МА, норма QoS или допустимая вероятность отказа в обслуживании.

Для оценки вероятности отказа в обслуживании P_k из-за занятости радиоканалов можно использовать B -формулу Эрланга, если поток требований пуассоновский. Но эта вероятность характеризует качество обслуживания МА при условии, когда МА во время разговора не передвигается. Если же во время связи МА пересекает несколько сот, то в каждой из них может не оказаться свободных радиоканалов для эстафетной передачи текущего соединения, а это приведет к его прерыванию. Поэтому для определения вероятности окончания разговора за время прохождения каждой соты P_c учитывается средняя продолжительность сеанса связи, радиус соты, скорость движения МА и дисперсия времени пребывания МА в соте. Необходимость учета дисперсии времени пребывания МА в соте очевидна, поскольку реально скорость движения МА не постоянная, да и маршрут прохождения за границы соты может быть не всегда оптимальным и зависит от конфигурации местности.

По вероятностям P_k и P_c можно найти полную вероятность отказа в обслуживании P . Однако, если точность вероятности P_c повышается тем, что кроме среднего значения времени пребывания МА в соте учитывается еще и его дисперсия, то и при расчете P_k необходимо учитывать не только среднее значение интенсивности нагрузки Λ , но и ее дисперсию D_Λ . Таким образом, вероятность отказа в обслуживании из-за занятости радиоканалов P_k предлагается рассчитывать так:

$$P_k = \frac{S}{\sum_{i=0}^m \exp\left[\frac{-(i-2\Lambda+m)(i-m)}{2\Lambda S}\right]} \left[1 - \frac{m - (\Lambda - \sqrt{D_\Lambda})}{\left(\frac{5}{S^2 - 1} + k\right) \sqrt{D_\Lambda}} \right],$$

где k – коэффициент, учитывающий закон распределения длительности связи.

Полная вероятность отказа в обслуживании с учетом прерывания связи при передвижении МА может быть рассчитана из формулы:

$$P = P_k \left[1 + \frac{(1 - P_k)(1 - P_{c1})}{1 - (1 - P_k)(1 - P_c)} \right],$$

где P_{c1} – вероятность окончания сеанса связи в первой соте.

Внедрение на сетях связи с коммутацией каналов технологий пакетной коммутации обеспечивает реальные возможности применения здесь пакетных сетей сигнализации. Сети сигнализации исследуются, как правило, с позиций сетевого и транспортного уровней модели OSI. Аналитически установлена зависимость между эффективностью использования каналов сигнализации на сетевом и транспортном уровнях с учетом длины проверочного кодового слова:

$$\eta_i = \eta_i' \rho_i \beta_i^P = \rho_i \frac{\beta_i^P}{1 + \frac{h_i}{L^P}},$$

где $\rho = \lambda / \mu = \lambda t$ – коэффициент загрузки сигнализационного канала на сетевом уровне; λ – интенсивность сигнализационных пакетов, μ – интенсивность обслуживания, t – средняя продолжительность обслуживания сигнализационных пакетов; β_u – коэффициент использования пропускной способности на канальном уровне (применяется самопроверяющийся циклический код); h_i – приведенная оценка длины проверочного кодового слова; L^P – длина информационной части в *MSU* (значащая сигнальная единица, используемая для передачи сигнальной информации).

Показано, что с уменьшением потерь на сетевом уровне η_u и при маленьком значении приведенной длины проверочных кодовых слов h_i при увеличении длины сигнализационных пакетов речевого вида L^P , коэффициент использования на транспортном уровне η_i увеличивается.

Результаты исследований, которые приведенные в разделе 6, опубликованы в работах [7, 22].

В седьмом разделе – „Исследование систем распределения информации методами имитационного моделирования” – рассмотрены методы статистических испытаний и принципы построения моделирующих алгоритмов. Разработана компьютерная программа моделирования СМО, на которую получено свидетельство о регистрации авторского права Украины № 32499.

Математические модели функционирования СРИ, рассмотренные в гл. 1, ориентированы на получение аналитических решений для обусловленных характеристик СРИ. Возможность получения таких решений ограничивается видом входных потоков, законом распределения продолжительности обслуживания и структурой СРИ. Использование методов моделирования позволяет ослабить те ограничения, которые относятся к виду входных потоков. Таким образом, основным инструментарием исследования задач, не поддающихся аналитическим и численным методам, является имитационное моделирование.

При имитационном моделировании алгоритм программы воссоздает процесс функционирования системы во времени, имитируя составные процесса и элементарные явления с сохранением их временной и логической структуры.

С помощью имитационной модели проверена достоверность всех предложенных методов анализа и синтеза СРИ, оценена их точность.

Результаты исследований, которые приведенные в разделе 7, изданы в работах автора [1, 3, 11, 26, 35].

ВЫВОДЫ

Решена важная научная проблема разработки новых методов анализа и синтеза СРИ, функционирующих в условиях мультисервисного трафика. Новыми научными результатами работы являются впервые разработанные методы расчета характеристик качества обслуживания (QoS) мультисервисного трафика для широко применяемых в телекоммуникациях моделей систем распределения информации. Предложенные методы создают основу для достоверного анализа и синтеза СРИ и повышения качества предоставления телекоммуникационных услуг. Итоги диссертации применимы при разработке, планировании, проектировании и эксплуатации мультисервисных сетей связи.

Основными научными и практическими результатами работы является:

1. На основе измерений и анализа статистических характеристик потоков трафика сетей связи, основанных на технологиях коммутации каналов и пакетов, исследования видов распределения вероятностно-временных параметров мультисервисного трафика, исследования влияния законов распределения продолжительности обслуживания на характеристики QoS в условиях мультисервисного трафика, исследования влияния явления самоподобия трафика на пропускную способность сети связи определено три типа реального трафика мультисервисных сетей, для описания которого следует применять определенные математические модели: однородный, разнородный и пачечный трафик. Степень отличия этих типов трафика определяется коэффициентом скученности нагрузки, значения которого 1-2, 2-15 и 15-60 соответственно.

2. В сегментах мультисервисной сети с однородным трафиком, описываемым моделью экспонентного потока или пуассоновского закона распределения интенсивности нагрузки, разработано:

- для полнодоступной СРИ (модель $M/D/m/\infty$ с очередью) новый метод расчета качества обслуживания, в котором основные характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ рассчитываются по характеристикам модели $M/M/m/\infty$ с использованием *C-формулы* Эрланга и полученной аппроксимирующей функции, зависящей от емкости системы и интенсивности нагрузки;
- для симметричной пакетной сети доступа (модель $M_B/M/m$ с потерями) новый рекуррентный метод расчета пропускной способности сети, в котором для повышения точности автономные кластеры сети рассчитываются в целом, без деления их на отдельные узлы доступа.

Разработанные методы существенно упрощают анализ и синтез СРИ при достаточной точности для первого из них и абсолютной точности для второго. В прототипе первого метода для расчетов характеристик QoS вместо точных аналитических формул использовались соответствующие диаграммы, а в прототипах второго – только приближенные оценки.

3. В сегментах сети с более неравномерным и разнородным трафиком, описываемым моделью гиперэкспонентного потока или нормального закона распределения интенсивности нагрузки:

- для полнодоступной СРИ (модель $NM/D/m$ с потерями) впервые определена функция распределения стационарных вероятностей состояний системы, учитывающая дисперсию интенсивности нагрузки;

- на основе предложенной функции распределения состояний системы для полнодоступной СРИ (модель $HM/G/m$ с потерями) впервые разработан новый метод расчета вероятности потери требования, учитывающий сучетность интенсивности нагрузки или пик-фактор трафика и вид закона распределения продолжительности обслуживания;
- для полнодоступной СРИ (модель $HM/D/m/\infty$ с очередью) впервые разработан новый итерационный метод расчета характеристик QoS , учитывающий увеличение интенсивности нагрузки и ее стандартного отклонения, которые получаются за счет дополнительного потока требований, поступающего в систему из очереди.

Гиперэкспонентная модель потока, как обобщение идеализированной пуассоновской модели, является адекватной модели трафика мультисервисных сетей с разнородными потоками требований, а это позволяет рассчитывать характеристики функционирования таких систем более точно.

4. В мультисервисных пакетных сетях с пачечным трафиком, описываемым моделями самоподобного потока или обобщенного (произвольного) закона распределения интенсивности нагрузки:

- для СРИ с самоподобным трафиком (модель $fBM/G/1/\infty$ с очередью) предложен новый энтропийный метод оценки характеристик QoS , что дает на порядок точнее результаты, чем приближенная формула Норроса;
- для СРИ с произвольным трафиком (модель $G/M/1/\infty$ с очередью) предложен метод оценки характеристик QoS , основанный на геометрическом распределении количества требований в системе в моменты поступления новых требований;
- для СРИ с произвольным трафиком (модель $G/D/1/\infty$ с очередью) предложен приближенный метод оценки характеристик QoS , точность которого определяется точностью оценки различия во времени ожидания требований в очереди и в системе в целом;
- для СРИ с произвольным трафиком (модель $G/G/1/\infty$ с очередью) установлены все функциональные соотношения между характеристиками QoS , что позволяет рассчитывать любую из характеристик QoS при приближенной оценке хотя бы одной из них.

5. Для сетей сигнализации ОКС № 7 предложен новый метод оценки производительности каналов сигнализации на сетевом и транспортном уровнях эталонной модели OSI, которая может применяться для сетей фиксированной связи и соединений с мобильными и пакетными сетями передачи данных.

6. Для сетей мобильной связи впервые разработан метод расчета вероятности отказа в предоставлении радиоканала, который учитывает не только дисперсию продолжительности пребывания мобильного абонента в зоне действия одной базовой станции, а и дисперсию интенсивности нагрузки, и вид закона распределения продолжительности сеанса связи мобильного абонента.

7. Разработана системы автоматизированного проектирования и моделирования телекоммуникационных сетей (свидетельства о регистрации авторского права Украины № 32499 и № 32500), предназначенные для выполнения рабочих проектов систем и сетей и исследования их характеристик.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ

1. Ложковський А.Г. Теорія масового обслуговування в телекомунікаціях / А.Г. Ложковський. – Одеса, 2010. – 112 с.
2. Відомчі будівельні норми України. Проектування телекомунікацій. ВБН В.2.2-33-2007. Споруди станційні місцевих телефонних мереж / А.П. Баєв, С.В. Зяблов, А.Г. Ложковський, М.О. Чумак та ін. – К.: 2007. – 98 с.
3. Ложковский А.Г. Статистическое моделирование полнодоступного пучка с потерями / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 1. – С. 75-82.
4. Ложковський А.Г. Вплив закону розподілу тривалості зайняття на якість обслуговування реального потоку викликів / А.Г. Ложковський // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 4. – С. 26-28.
5. Ложковський А.Г. Нова методика оцінювання ймовірності втрат викликів, наближена до реальних умов / А.Г. Ложковський // К.: Зв'язок. – 2004. – № 3. – С. 52-53.
6. Ложковский А.Г. Исследования системы обслуживания с ожиданием и рекуррентным потоком вызовов / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 2. – С. 56-59.
7. Ложковский А.Г. Метод расчета качества обслуживания абонентов подвижной связи / А.Г. Ложковский // Праці УНДПРТ. – 2004. – № 4(40). – С. 21-23.
8. Ложковский А.Г. Метод расчета стационарного распределения вероятностей состояний в модели Пальма / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2005. – № 1. – С. 58-62.
9. Ложковский А.Г. Метод расчета систем обслуживания с ожиданием при произвольном потоке вызовов / А.Г. Ложковский // К.: Зв'язок. – 2006. – № 1. – С. 57-60.
10. Ложковский А.Г. Рекуррентный метод расчета пропускной способности пакетной сети доступа / А.Г. Ложковский, Н.С. Салманов, Н.А. Чумак // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – № 2. – С. 44-48.
11. Ложковский А.Г. Моделирование многоканальной системы обслуживания с организацией очереди / А.Г. Ложковский, Н.С. Салманов, О.В. Вербанов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 3/6 (27). – С. 72-76.
12. Ложковский А.Г. Проблемы перехода к сетям нового поколения NGN / А.Г. Ложковский, О.В. Вербанов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – № 1. – С. 161-163.
13. Ложковский А.Г. Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57-62.
14. Ложковский А.Г. Влияние закона распределения длительности обслуживания в условиях самоподобного трафика на параметры QoS / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4/3(34). – С. 46-50.

15. Ложковский А.Г. Сравнительный анализ методов расчета характеристик качества обслуживания при самоподобных потоках в сети / А.Г. Ложковский // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. – Вип. 47. – К.: 2008. – С. 187-193.
16. Ложковский А.Г. Простой метод расчета багатоканальной системы с чергою в моделі $M/D/m/r=\infty$ (Задача Кроммеліна) / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 16-19.
17. Ложковский А.Г. Расчет качества обслуживания в пакетной сети за неограниченной длины накопительного буфера / А.Г. Ложковский // К.: Зв'язок. – 2009. – № 3(87). – С. 17-19.
18. Ложковский А.Г. Методы анализа и синтеза систем распределения информации в условиях реального трафика / А.Г. Ложковский // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: „Радіоелектроніка та телекомунікації”. – Вип. 645. – 2009. – С.146-156.
19. Ложковский А.Г. Исследование функционирования телекоммуникационных систем в условиях самоподобного трафика / А.Г. Ложковский, К.Б. Нікіфоренко // Наукові записки УНДІЗ. Науково-виробничий збірник. – 2009. – № 2(10). – С. 60-64.
20. Ложковский А.Г. Модель мультисервисного трафика и метод расчета параметров QoS при его обслуживании / А.Г. Ложковский // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 157. – С. 48-52.
21. Ложковский А.Г. Расчет характеристик QoS в одноканальной системе с непуассоновским трафиком / А.Г. Ложковский, // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 54. – К.: 2009. – С.154-160.
22. Алиев Г.А. Оценка эффективности использования каналов сигнализации на транспортном уровне / Г.А. Алиев, А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 93-97.
23. Ложковский А.Г. Метод расчета одноканальных систем с бесконечной очередью и произвольным потоком заявок / А.Г. Ложковский // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С. 50-53
24. Ложковский А.Г. Математическая модель трафика в сетях с коммутацией пакетов / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 63-67.
25. Ложковский А.Г. Імовірність втрат в системі з гіперекспонентним потоком за постійної тривалості обслуговування вимог / А.Г. Ложковский // Наукові записки УНДІЗ. Науково-виробничий збірник. – 2010. – № 1(13). – С. 79-83.
26. Моделювання систем масового обслуговування. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 32499 / А.Г. Ложковский // Дата реєстрації 23.03.2010.
27. Система автоматизованого проектування телекомунікаційних мереж. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 32500 / А.Г. Ложковский // Дата реєстрації 23.03.2010.

28. Ложковський А.Г. Влияние закона распределения длительности занятия на качество обслуживания / А.Г. Ложковський // Труды VII междунар. НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”. – Одесса. – 2003. – С. 103-104.
29. Захарченко Н.В. Методы расчёта телекоммуникационного оборудования в условиях реального потока вызовов / Н.В. Захарченко, А.Г. Ложковський // Вісник Укр. Будинку економ. та наук. знань. – К.: 2004. – № 4. – С. 102-109.
30. Ложковський А.Г. Характеристики качества обслуживания реальных потоков вызовов в системе с ожиданием / А.Г. Ложковський // VIII междунар. НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”. – Одесса. – 2004. – С. 78-79.
31. Ложковський А.Г. Анализ СМО с ожиданием и произвольным потоком заявок на обслуживание / А.Г. Ложковський // Труды II междунар. семинара „Информационные системы и технологии”, – Одесса. – 2004 – С. 23-26.
32. Ложковський А.Г. Автоматизация проектирования телекоммуникационных сетей / А.Г. Ложковський, Н.В. Коломиец, Т.Я. Бучак // II-й междунар. симпозиум «Телекоммуникации без границ». – Одесса. – 2005. – С. 11-12.
33. Ложковський А.Г. Оптимальное проектирование телекоммуникационных сетей / А.Г. Ложковський // Труды III междунар. семинара „Информационные системы и технологии”. – Одесса. – 2005. – С. 38-41.
34. Ложковський А.Г. Проблемы расчета телекоммуникационных служб мультисервисных сетей / А.Г. Ложковський, Е.В. Лысюк // IX междунар. конф. „Проблемы функционирования информационных сетей” / Ин-т вычислит. математики и математической геофизики СОРАН, г. Новосибирск. – 2006.
35. Ложковський А.Г. Имитационное моделирование, как инструментальный исследования моделей потоков в NGN / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали III міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”. – Вінниця. – 2007. – С. 29-30.
36. Ложковський А.Г. Модель обслуговування навантаження мультисервісною мережею з контролем якості обслуговування / А.Г. Ложковський, О.В. Лисюк // матеріали III міжнар. НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”. – Вінниця. – 2007. – С. 31-32.
37. Ложковський А.Г. Спосіб оцінки характеристик якості обслуговування різномірної завантаженості в мультисервісних мережах / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали 62 НТК. викладачів, науковців, молодих вчених аспірантів та магістрантів „Освіта і наука”. – Одеса. – 2007. – С. 10-11.
38. Ложковський А.Г. Методы расчета качества обслуживания в мультисервисных сетях связи / А.Г. Ложковський // The 2-nd International Conference „Telecommunication, Electronics and Informatics”. – Technical University of Moldova, Chishinau. – 2008. – P. 117-126.
39. Ложковський А.Г, Технологічні аспекти впровадження мультисервісних мереж / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали IV Міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 16.

40. Ложковский А.Г. Исследование параметров телефонной нагрузки на ведомственной сети / А.Г. Ложковский, В.В. Ганчев, В.Ю. Гордиенко // IV Міжнародна НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 17.
41. Ложковский А.Г. Анализ показателей качества обслуживания вызовов на телефонной сети / А.Г. Ложковский, К.А. Петрусенко // матеріали IV Міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 18.
42. Loshkovskiy A.G. A simple way to calculate the single-server queue / A.G. Loshkovskiy // матеріали НПК „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій”. – Львів, 2009. – С. 13-15.
43. Loshkovskiy A.G. Planning telecommunication system throughput / A.G. Loshkovskiy, Y.O. Babich // НПК „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій”. – Львів, 2009. – С. 15-17.
44. Ложковський А.Г. Развитие теории телетрафика / А.Г. Ложковский // матеріали 64-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науков. та аспірантів. – Одеса, 2009. – С. 108-116.

АНОТАЦІЇ

Ложковський А.Г. Аналіз і синтез систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, 2010.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної проблеми розробки нових методів аналізу і синтезу структурно-складних систем розподілу інформації, що функціонують в умовах мультисервісного трафіка.

Класифіковано три типи трафіка мультисервісних мереж зв'язку, які властиві окремим сегментам або мережі в цілому. Ступінь відмінності трафіка визначається коефіцієнтом скупченості навантаження. Для кожного з його типів розроблено відповідні методи оцінки характеристик QoS при обробці трафіка в системах розподілу інформації, представлених моделями: $M/D/m/\infty$, $M_B/M/m$, $NM/G/m$, $NM/D/m/\infty$, $fBM/G/1/\infty$, $G/M/1/\infty$ та $G/D/1/\infty$. Для моделі $G/G/1/\infty$ встановлені аналітичні взаємозв'язки між всіма характеристиками QoS .

Для мережі мобільного зв'язку розроблено метод розрахунку ймовірності відмови в наданні радіоканалу, а для мережі сигналізації – метод оцінки продуктивності каналів сигналізації на мережному та транспортному рівнях.

Розроблено систему автоматизованого проектування та імітаційного моделювання телекомунікаційних систем і мереж.

Ключові слова: телекомунікаційна мультисервісна мережа, модель трафіка, пікфактор трафіка, аналіз і синтез систем розподілу інформації,.

Ложковский А.Г. Анализ и синтез систем распределения информации в условиях мультисервисного трафика. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса, 2010.

Диссертация посвящена решению научно-практической проблемы разработки новых методов анализа и синтеза систем распределения информации (СРИ), функционирующих в условиях мультисервисного трафика.

Классифицировано три типа трафика мультисервисных сетей, имеющих место в отдельных сегментах или сети в целом: однородный, разнородный и пачечный. Степень их отличия определяется пик-фактором трафика или коэффициентом скученности нагрузки, находящимся в пределах 1-2, 2-15 и 15-60 соответственно. Для каждого из типов трафика разработаны адекватные методы расчета характеристик качества обслуживания (QoS).

Для СРИ с однородным трафиком (модель $M/D/m/\infty$) разработан новый метод расчета качества обслуживания, в котором основные характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ рассчитываются по характеристикам модели $M/M/m/\infty$. При этом используется C -формула Эрланга и новая аппроксимирующая функция, зависящая от емкости системы и интенсивности нагрузки.

Для симметричной пакетной сети доступа, представленной моделью $M_B/M/m$, разработан рекуррентный метод расчета пропускной способности сети, где с целью повышения точности предусматривается расчет автономных кластеров сети в целом, без разделения их на отдельные узлы доступа.

В сегментах сети с разнородным и более неравномерным трафиком, представленного моделью гиперэкспоненциального потока или нормального закона распределения интенсивности нагрузки:

- для модели $NM/D/m$ определена функция распределения стационарных вероятностей состояний системы, учитывающая дисперсию нагрузки;
- для модели $NM/G/m$ разработан метод расчета вероятности потери заявки, учитывающий пик-фактор трафика и вид закона распределения продолжительности обслуживания;
- для модели $NM/D/m/\infty$ разработан итерационный метод расчета характеристик QoS , учитывающий увеличение интенсивности нагрузки и ее стандартного отклонения, образующихся за счет дополнительного потока заявок, поступающих в систему из очереди

В мультисервисных пакетных сетях связи с пачечным трафиком, представляемого моделями самоподобного потока или обобщенного закона распределения интенсивности нагрузки:

- для модели $fBM/G/1/\infty$ разработан энтропийный метод оценки характеристик QoS самоподобного трафика, что дает на порядок точнее результаты, чем известная приближенная формула Норроса;
- для модели $G/M/1/\infty$ предложен метод оценки характеристик QoS , основанный на геометрическом распределении количества заявок в системе в моменты поступления новых заявок;

– для модели $G/D/1/\infty$ предложен приближенный метод оценки характеристик QoS , точность которого определяется точностью оценки различия во времени ожидания требований в очереди и в системе;

– для модели $G/G/1/\infty$ установлены функциональные соотношения между всеми характеристиками QoS , что позволяет рассчитывать любую из характеристик QoS при приближенной оценке хотя бы одной из них.

Для сети сигнализации ОКС № 7 предложен метод оценки производительности каналов сигнализации на сетевом и транспортном уровнях эталонной модели ВОС, применимый для сетей фиксированной связи и соединений с мобильными и пакетными сетями передачи данных.

Для сети мобильной связи разработан метод расчета вероятности отказа в предоставлении радиоканала, учитывающий не только дисперсию продолжительности пребывания мобильного абонента в зоне действия базовой станции, а дисперсию интенсивности нагрузки и вид закона распределения продолжительности сеанса связи мобильного абонента.

Разработаны система автоматизированного проектирования и моделирования телекоммуникационных сетей, предназначенные для выполнения рабочих проектов телекоммуникационных систем и сетей и исследования их характеристик

Ключевые слова: телекоммуникационная мультисервисная сеть, модель трафика, пик-фактор трафика, анализ и синтез систем распределения информации.

Lozhkovskyi A.G. The analysis and synthesis of information distribution systems in conditions of multiservice traffic. – The Manuscript.

Thesis for the academic degree of the Doctor of Engineering science in a speciality 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Odessa national academy of telecommunication is named after A. S. Popov, Odessa, 2010.

The dissertation devoted to the decision of a scientific-practical problem of the analysis and synthesis of structural-complex information distribution systems, operating in conditions of multiservice traffic. Three traffic types of the multiservice telecommunication networks, which are inherent in separate segments or network as a whole, are classified. The difference degree of traffic is defined by peak-factor of the load. For each of his types the appropriate calculation methods of the characteristics QoS are developed in conditions of processing traffic in information distribution systems, which introduced by such models: $M/D/m/\infty$, $M_B/M/m$, $HM/G/m$, $HM/D/m/\infty$, $fBM/G/1/\infty$, $G/M/1/\infty$ и $G/D/1/\infty$. For model of $G/G/1/\infty$ the analytical intercouplings between all characteristics QoS are established.

For a network of mobile communication the calculation method of probability of a refusal in an allotment of a radio channel, and for the signaling network - method of efficiency rating of a signaling channels at network and transport levels is developed. The automated design engineering system and simulation model of telecommunication systems and networks is developed.

Keywords: a telecommunication multiservice network, model of self-similar traffic, information distribution system, analysis and synthesis.

Список обозначений и сокращений

$C_m(\Lambda)$	– <i>C-формула Эрланга</i>
$E_m(\Lambda)$	– <i>B-формула Эрланга</i>
N	– среднее количество требований в системе
$P_{w>0}$	– вероятность ожидания
P_B	– вероятность потери (блокирования) требования
Q	– средняя длина очереди
S	– коэффициент сгущенности нагрузки (пик-фактор трафика)
T	– средняя продолжительность пребывания требований в системе
t_q	– средняя продолжительность ожидания требований в очереди
W	– средняя продолжительность ожидания требований в системе
x	– продолжительность обслуживания требования
Y	– интенсивность обслуженной нагрузки
z	– продолжительность интервала времени между требованиями
λ	– интенсивность потока требований
Λ	– интенсивность поступающей нагрузки
μ	– интенсивность обслуживания требований
ρ	– интенсивность удельной нагрузки
<i>FIFO</i>	– <i>First in first out</i> (первый обслуживается первым)
<i>NGN</i>	– <i>Next Generation Networks</i> (сети следующего поколения)
<i>OSI</i>	– <i>Open System Interconnection</i> (взаимодействие открытых систем)
<i>QoS</i>	– <i>Quality of Service</i> (качество обслуживания)
СП	– случайный процесс
МА	– мобильный абонент
ОКС №7	– общеканальная сигнализация №7
СМО	– система массового обслуживания
СРИ	– система распределения информации

Подписано в печать _____.2010 г. Объем 1,9 печ. лист.
Формат 60x88/16 Зам. № _____. Тираж 120 экз.
Отпечатано на издательском оборудовании фирмы RISO в типографии редакционно-издательского центра
Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова.

Украина, 65029, г. Одесса, ул. Старопортофранковская, 61
ОНАС им. А.С. Попова, 2010

