

На правах рукописи



Гайдамака Юлия Васильевна

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ И ОДНОРАНГОВЫХ СЕТЕЙ**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов» Министерства образования и науки Российской Федерации на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Самуйлов Константин Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Вишневыи Владимир Миронович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией № 69
«Управление сетевыми системами», Институт
проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН)

Морозов Евсей Викторович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории
математической кибернетики, Институт
прикладных математических исследований
Карельского научного центра Российской
академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН)

Моисеева Светлана Петровна,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры теории вероятностей и
математической статистики, Национальный
исследовательский Томский государственный
университет (ТГУ)

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) (127051, г. Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, стр. 1).

Защита диссертации состоится 16 июня 2017 г. в 15 час. 30 мин. по адресу 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 110 на заседании диссертационного совета Д 212.203.28 при ФГАОУ ВО РУДН (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6).

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном центре (Научная библиотека) Российского университета дружбы народов (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6) и на сайте <http://dissovet.rudn.ru>.

Автореферат размещен на сайте <http://dissovet.rudn.ru> « » марта 2017 г.

Автореферат разослан « » марта 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.203.01
кандидат физико-математических наук,
доцент



Васильев
Сергей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Тенденции развития современных телекоммуникаций определяются фундаментальным изменением, которое по своей значимости превосходит изменения в персональных коммуникациях, вызванные переходом от телеграфа к телефону, и заключается в переходе от сетей с коммутацией каналов к сетям с коммутацией пакетов на базе IP-технологий. Принципиально новым объектом исследований становится мультисервисная сеть связи, отвечающая требованиям мультисервисности, как независимости технологий предоставления услуг от транспортных технологий, широкополосности, как возможности изменения скорости передачи информации в широком диапазоне, мультимедийности, как возможности передавать многокомпонентную информацию (речь, видео, аудио).

Это изменение влечет за собой существенные перемены в научных исследованиях, в том числе, в принципах построения математических моделей и разработки на их базе методов анализа показателей эффективности сети. Во-первых, в мультисервисных сетях связи появились новые типы соединений, применяемых при передаче потокового видео, что потребовало существенной модификации моделей сети с коммутацией каналов и методов их анализа, обеспечивающих возможность создания эффективных вычислительных алгоритмов. Во-вторых, кардинально изменились системы управления процессом установления соединений (т.н. «системы сигнализации»), и были обнаружены проблемы, связанные с перегрузками узлов сети. Возникла необходимость в создании новых математических моделей управления входящими потоками сообщений и разработки на базе этих моделей механизмов управления перегрузками. В-третьих, появились новые типы наложенных одноранговых сетей с высокими требованиями к пропускной способности - т.н. «пиринговые» сети (peer-to-peer, P2P) и сети прямого взаимодействия беспроводных устройств (device-to-device communications, D2D). Потребовались новые математические модели для анализа показателей эффективности, которые являются функционалами как от показателей качества обслуживания сети (Quality of Service, QoS), так и от показателей качества восприятия услуг пользователем (Quality of Experience, QoE). Наиболее важными показателями QoS являются вероятность блокировки запросов пользователей, время установления соединения, параметры механизмов управления соединением, характеристики интерференции в D2D сети, а наиболее важными показателями QoE является вероятность непрерывного воспроизведения видео потока в P2P-сети и др.

Исследования в области создания моделей и соответствующих методов анализа и расчета показателей эффективности мультисервисных сетей ведутся начиная с 1990-х годов. Однако полученные результаты оказались недостаточными в современных условиях, поэтому исследования продолжились в направлении развития новых подходов, учитывающих

различные типы трафика, специфику новых систем сигнализации и особенности функционирования одноранговых сетей. Фундаментальные исследования ведутся в области классических моделей мультисервисных сетей с различными комбинациями трех типов трафика – одноадресного, многоадресного и эластичного – и для различных приложений, например, межмашинных взаимодействий (machine-to-machine communications, M2M). В области создания надежного механизма по предотвращению перегрузок в сети серверов, управляющих установлением соединения, исследуются новые модели систем массового обслуживания (СМО) с пороговым управлением входящим потоком. В связи с активным внедрением беспроводных сетей LTE (Long Term Evolution) исследования развиваются как в области задач разделения радиоресурсов и задач оценки характеристик интерференции в сети радиодоступа, так и в области анализа и расчета показателей качества обслуживания на базе моделей теории телетрафика и теории массового обслуживания. Наконец, исследования одноранговых сетей в области обслуживания трафика ведутся по нескольким направлениям с использованием теории конечных цепей Маркова (ц.м.), в т.ч. числе в области моделирования и анализа показателей качества восприятия услуг, например, услуги цифрового вещательного телевидения. Теоретические и прикладные основы исследований в перечисленных направлениях базируются в основном на результатах в области дискретной математики, теории конечных графов, теории вероятностей, теории случайных процессов и теории массового обслуживания. В числе российских исследователей и математиков в этой области следует назвать Г.П. Башарина, П.П. Бочарова, Е.В. Булинскую, В.М. Вишневого, Б.В. Гнеденко, А.Н. Дудина, А.И. Зейфмана, В.А. Ивницкого, В.Ю. Королева, А.А. Назарова, А.Е. Кучерявого, А.И. Ляхова, В.А. Наумова, Е.В. Морозова, С.П. Моисееву, Ю.Н. Орлова, А.В. Печинкина, А.П. Пшеничникова, О.Н. Ромашкову, К.Е. Самуйлова, И.А. Соколова, С.Н. Степанова, И.И. Цитовича, С.Я. Шоргина и др., а наиболее значимыми зарубежными авторами являются J.G. Andrews, F. Baskett, E. Gelenbe, M. Dohler, V.B. Iversen, M. Haenggi, F. Kelly, L. Kleinrock, P.J. Kuhn, Y. Liu, D. Lucantoni, D.M. Chiu, M.F. Neuts, O. Martikainen, B. Mukherjee, R. Ramaswami, K.W. Ross, H. Takagi, W. Whitt и др.

Вышеизложенное определяет актуальность создания теоретических основ для построения комплекса математических моделей, позволяющих модифицировать, совершенствовать и разрабатывать методы анализа и расчета показателей качества обслуживания и показателей качества восприятия услуг мультисервисных и одноранговых сетей. При этом предпочтительно искать решения не среди комплексных моделей, требующих разработки сложного математического аппарата, который с точки зрения вычислений практически неприменим, а среди наиболее изученных моделей, которые при этом позволяли бы эффективно и достаточно точно вычислять показатели качества мультисервисных и одноранговых сетей.

Цель и задачи исследований. Диссертация посвящена решению фундаментальной научной проблемы – созданию теоретических основ и комплекса вероятностных моделей и разработке на их основе методов для анализа и расчета показателей эффективности мультисервисных и одноранговых сетей. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- построение и исследование моделей обслуживания трафика и методов расчета их характеристик, учитывающих наряду с трафиком одноадресных соединений многоадресный трафик, а в беспроводных сетях – трафик межмашинных взаимодействий;
- построение моделей сетей массового обслуживания (СeMO) для оценки времени установления соединения и моделей СМО с управлением входящим потоком для анализа и расчета показателей эффективности серверов протокола установления сессий в условиях перегрузок;
- построение и исследование моделей и методов для оценки показателей качества восприятия услуг одноранговых сетей, представленных пиринговыми сетями с потоковым трафиком и беспроводными сетями взаимодействующих устройств.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы дискретной математики и теории графов, теории вероятностей, теории марковских случайных процессов, теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Построение модели обслуживания одноадресного и многоадресного трафика проведено с использованием теории обратимых марковских процессов. Модели с пороговым управлением входящим потоком построены в виде однолинейных СМО с групповым поступлением заявок, а также поллинговых систем с несколькими очередями и различными дисциплинами обслуживания очередей. Анализ моделей одноранговых сетей проведен с помощью аппарата дискретных ц.м. и имитационного моделирования методом Монте-Карло. Наконец, построение моделей взаимодействия беспроводных устройств выполнено с использованием методов стохастической геометрии.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Построена новая модель мультисервисной сети на базе двух моделей обслуживания многоадресного трафика и на ее основе разработан рекурсивный алгоритм для расчета вероятностных характеристик модели мультисервисной сети с одноадресными и многоадресными соединениями.
2. Разработан метод оценки времени установления соединений в мультисервисных сетях, основанный на моделях экспоненциальных, неэкспоненциальных СеМО и многофазных СМО. Ранее комплекс моделей с возможностью расчета квантиля времени установления соединения для

оценки времени установления соединений в мультисервисных сетях не применялся.

3. Разработаны методы анализа показателей эффективности сервера протокола установления сессий в условиях перегрузок на базе моделей СМО с поллингом и СМО с гистерезисным управлением нагрузкой. Ранее ни поллинг с пороговым управлением, ни гистерезисное управление не применялись при построении моделей сервера протокола установления сессий.
4. Разработан метод анализа показателей эффективности одноранговой пиринговой сети с потоковым трафиком на базе новой модели буферизации данных, включающей формальное описание стратегии загрузки данных, временные задержки доставки данных, вероятности подключения и отключения пользователей, их местоположение и суточную активность.
5. Разработан метод анализа плотности отношения сигнал/интерференция для пары и нескольких устройств в одноранговой беспроводной сети взаимодействующих устройств на базе модели стохастической геометрии. В отличие от известных, новый метод применим для различных распределений расстояний между взаимодействующими устройствами.

Основные положения работы, выносимые на защиту.

1. Построенные марковские модели мультисервисных сетей, учитывающие наряду с трафиком одноадресных соединений многоадресный трафик, а в беспроводных сетях - трафик межмашинных взаимодействий, и допускающие мультипликативное решение для стационарного распределения, позволяют разрабатывать методы анализа и расчета вероятностных характеристик на базе рекурсивных алгоритмов.
2. Разработанные методы, основанные на моделях неоднородных экспоненциальных СеМО, однородных неэкспоненциальных СеМО и многофазных СМО с фоновым трафиком на фазах системы, применимы для оценки времени установления соединений в мультисервисных сетях, в т.ч. для услуг мультимедийной подсистемы.
3. Построенная двухпоточковая поллинговая модель с пороговым управлением очередью приоритетных сообщений применима для анализа показателей эффективности управления перегрузками сервера протокола установления сессий в условиях приоритизации обработки сообщений. Показано, что преимущество по критерию вероятности пребывания сервера в множестве состояний перегрузки имеет исчерпывающая дисциплина.
4. Построенная модель СМО с гистерезисным двухпороговым управлением входящим потоком применима для анализа механизма управления перегрузками сервера протокола установления сессий. Модель позволяет вычислять показатели эффективности управления – вероятность блокировки

и характеристики случайной величины (с.в.) времени выхода сервера из состояния перегрузки.

5. Построенная в виде ц.м. модель буферизации данных в одноранговой сети с потоковым трафиком применима для расчета вероятности всеобщей передачи и вероятности непрерывного воспроизведения видеопотока. Показано, что полученная на базе модели экспоненциальной СеМО аппроксимация нормальным законом дает метод расчета вероятности всеобщей передачи в сети вещательного телевидения с учетом популярности каналов.
6. Построенная модель одноранговой сети с потоковым трафиком показывает существование субоптимальной стратегии выбора группы соседей и оптимальной стратегии выбора порции данных, совместное применение которых увеличивает вероятность непрерывного воспроизведения. Модель учитывает географическое положение и суточную активность пользователей, а также две стратегии загрузки - разбиения пользователей на группы соседей и выбора порции данных.
7. Разработанный на основе модели стохастической геометрии метод для расчета плотности отношения сигнал/интерференция в одноранговой сети беспроводных взаимодействующих устройств позволяет оценить этот показатель для пары и нескольких взаимодействующих устройств.

Личный вклад. Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, математические модели, методы анализа и вычислительные алгоритмы разработаны при его преобладающем участии или под его научным руководством. Направления исследований диссертационной работы, формулировки проблем и постановки задач обсуждались с научным консультантом проф. К.Е. Самуйловым и с заслуженным деятелем науки РФ проф. Г.П. Башариным, что отражено в совместных публикациях, в которых основные результаты и их доказательства принадлежат диссертанту.

Теоретическая и практическая значимость. В диссертационной работе сделан вклад в теоретические основы методов исследования мультисервисных сетей в виде комплекса вероятностных моделей, моделей теории систем и сетей массового обслуживания и моделей математической теории телетрафика, а также моделей стохастической геометрии, предназначенных для анализа, расчета и оценки ключевых показателей эффективности. С целью широкого применения полученных результатов в научно-исследовательских, проектных организациях и в телекоммуникационных компаниях на основании теоретических исследований разработаны алгоритмы и программные средства для расчета важнейших для планирования сетей показателей качества обслуживания и показателей качества восприятия пользователей. На отдельные модули программных средств получены свидетельства о государственной регистрации.

Результаты диссертационной работы легли в основу учебно-методических комплексов для лекционных курсов, постановок задач для выпускных работ бакалавров по направлениям подготовки 010200.62 «Математика и компьютерные науки» и 010400.62 «Прикладная математика и информатика», магистерских диссертаций по специализации «Теория вероятностей и математическая статистика» и кандидатских диссертаций по специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

Часть результатов диссертационной работы получена при выполнении ряда крупных научно-исследовательских проектов, где автор диссертационной работы являлась руководителем и исполнителем, в том числе, при исследованиях по грантам РФФИ, РНФ, а также НИР, выполняемых по приоритетным научным направлениям в РУДН.

Достоверность полученных результатов подтверждается математически корректными выводами и доказательствами теорем и других утверждений, корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки исследуемых информационных процессов в мультисервисных сетях, использованием известных положений фундаментальных методов, соответствием полученных теоретических результатов данным вычислительного эксперимента и опубликованными данными о показателях эффективности исследуемых систем, а также с результатами исследований других авторов.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с паспортом специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» и включает оригинальные результаты в области исследования информационных процессов и требований их пользователей к показателям эффективности, в области разработки моделей информационных процессов в мультисервисных сетях, разработки общих принципов организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности. Таким образом, диссертационное исследование соответствует следующим разделам паспорта специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики»:

1. Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей.
2. Исследование информационных структур, разработка и анализ моделей информационных процессов и структур.
13. Общие принципы организации телекоммуникационных систем и оценки их эффективности.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и

семинарах: Всероссийская научная конференция факультета физико-математических наук РУДН, Москва, 2002-2010 гг.; Всероссийская конференция «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», Москва; 2011-2016 гг.; International IEEE Conference Eurocon 2009, St.Petersburg, 2009; International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking NEW2AN, St.Petersburg, 2009-2016; International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT, Moscow, 2010, St.Petersburg, 2012, 2014; European Conference on Modelling and Simulation ECMS, Koblenz, 2012, Aalesund, 2013, Brescia, 2014, Albena, 2015, Regensburg, 2016; Международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: теория и приложения» DCCN, 2010, 2013, 2015; XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ, Москва, 2014; Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование», Москва, ВМиК МГУ, 2011-2015; Международная конференция «Теория вероятностей и ее приложения», посвященная 100-летию со дня рождения Б.В. Гнеденко, Москва, 2012; 12th Annual International Conference «Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'12)», Riga, 2012; International Workshop on Simulation IWS, Rimini, 2013, Vienna, 2015; European Conference on Operational Research EURO, Vilnius, 2012, Glasgow, 2015; International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM, Rhodes, 2014, 2015; Международная научно-практическая конференция имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование» ИТММ, 2014, 2015, 2016; Всероссийская научная конференция «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения», Москва, 2013, 2014; 68-я Всероссийская конференция, посвященная дню радио РНТОРЕС им. А.С. Попова, Москва, 2013; International Seminar on Stability Problems for Stochastic Models ISSPSM, Svetlogorsk, 2011, 2012, Moscow, 2013, Trondheim, 2014, Tampere, 2015; International Conference INternet of THings and ITs ENablers INTHITEN, St. Petersburg, 2013; 13th International Conference on Networks ICN, Nice, 2014; 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies IFORS, Barcelona, 2014; International Science and Technology Conference Modern Networking Technologies MoNeTec, Moscow, 2014; 22nd European Wireless conference EW, Oulu, 2016; VII Международная научная конференция «Компьютерные науки и информационные технологии», Саратов, 2016; семинары РУДН, МТУСИ, СПб ГУТ, ИПИ РАН, ИПУ РАН, Большой семинар кафедры теории вероятностей МГУ.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 40 опубликованных работах, в том числе в 1 монографии; в 24 статьях, опубликованных в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней

доктора и кандидата наук, и в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus; в 11 полнотекстовых статьях, опубликованных в трудах конференций, индексируемых Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 235 страниц, включая 59 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 258 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведен обзор публикаций по этой теме, сформулированы цель и задачи исследований, кратко изложены содержание и основные результаты диссертации по главам, охарактеризованы их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Глава 1 диссертационной работы посвящена анализу особенностей построения моделей мультисервисных сетей. В *разделе 1.1* дан краткий обзор моделей мультисервисных и одноранговых сетей, обосновывающий актуальность и новизну исследований. Анализ актуальности и новизны по конкретным моделям и методам проведен и в других разделах диссертации. В *разделе 1.2* исследована концепция качества сетей последующих поколений и ее связь с показателями эффективности мультисервисных сетей, исследуемых в диссертационной работе. Показано, что исследуются три класса показателей эффективности – качество восприятия QoE, качество обслуживания QoS и качество функционирования сети (Network Performance, NP). К показателям качества восприятия относятся вероятность непрерывного воспроизведения и вероятность всеобщей передачи в P2P-сети, к показателям качества обслуживания – вероятность блокировки запроса и время установления соединения, а к показателям качества функционирования сети – задержка передачи, параметры управления перегрузками, интерференция в беспроводной сети взаимодействующих устройств. В *разделе 1.3* исследованы особенности обслуживания трафика в мультисервисной сети – трафика услуг многоадресных соединений и его совместного обслуживания с трафиком одноадресных соединений, особенности обслуживания трафика межмашинных взаимодействий (machine-to-machine, M2M) и его совместного обслуживания с трафиком взаимодействия традиционных пользователей (human-to-human, H2H) в сети радиодоступа LTE, а также особенности обслуживания трафика в пассивной оптической сети. В этих случаях показано, что для анализа показателей эффективности могут быть построены модели СМО, функционирование которых описывается конечным обратимым марковским процессом, стационарное распределение которого допускает мультипликативное представление. Автор диссертационной работы впервые исследовала модель мультисервисной сети с многоадресными соединениями, результаты анализа которой являются теоретическим вкладом в основы

математической теории телетрафика¹. В том числе доказана следующая фундаментальная теорема.

Будем рассматривать систему в простейших предположениях, что все логические пути в мультисервисной сети независимы, поток запросов на установление (m, p, s) -пути является пуассоновским с параметром λ_{mps} , время занятия пути распределено по экспоненциальному закону с параметром μ_{mps} . Состояние логического пути или (m, p, s) -пути отражает предоставление m -услуги от s -источника по p -маршруту. Поведение (m, p, s) -пути описывается в терминах СМО с «прозрачными» заявками. Пусть $\xi_{mps}(t)$ – число заявок в СМО в момент времени $t \geq 0$ со стационарным распределением

$$p_n = P\{\xi_{mps}(t) = n\} = \frac{1}{1 + \rho_{mps}} \left(\frac{\rho_{mps}}{1 + \rho_{mps}} \right)^n, \quad n \geq 0, \quad \text{где } \rho_{mps} = \lambda_{mps} / \mu_{mps}. \quad \text{Введем}$$

случайный процесс $\{X_{mps}(t), t \geq 0\}$, описывающий поведение (m, p, s) -пути, и его стационарное распределение $\pi_{mps}(x_{mps}) = P\{X_{mps}(t) = x_{mps}\}$, $x_{mps} \in \{0, 1\}$.

Показано, что этот процесс является марковским (м.п.) и обратимым. Для описания функционирования всех логических путей введем составной м.п. $\tilde{X}(t) = (X_{mps}(t))_{m \in \mathcal{M}_s, p \in \mathcal{P}_s, s \in \mathcal{S}}$, который на $\tilde{\mathcal{X}} = \{0, 1\}^{\sum_{s \in \mathcal{S}} M_s P_s}$ является обратимым по построению. Пусть $X(t)$ - сужение м.п. $\tilde{X}(t)$ на множество $\mathcal{X} \subseteq \tilde{\mathcal{X}}$, $\mathcal{X} = \{\mathbf{x} : c_l(\mathbf{x}) \leq C_l, l \in \mathcal{L}\}$, где C_l емкость l -го звена сети.

Теорема 1.1. Стационарное распределение $\pi(\mathbf{x}) = P\{X(t) = \mathbf{x}\}$ м.п. $\{X(t), t \geq 0\}$ имеет мультипликативный вид

$$\pi(\mathbf{x}) = \pi(\mathbf{0}) \prod_{s \in \mathcal{S}} \prod_{p \in \mathcal{P}_s} \prod_{m \in \mathcal{M}_s} \rho_{mps}^{x_{mps}}, \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}, \quad (1.1)$$

$$\pi^{-1}(\mathbf{0}) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \prod_{s \in \mathcal{S}} \prod_{p \in \mathcal{P}_s} \prod_{m \in \mathcal{M}_s} \rho_{mps}^{x_{mps}}. \quad \blacksquare \quad (1.2)$$

В разделе 1.4 исследованы особенности и проблемы управления нагрузкой в сети серверов протокола установления сессий (Session Initiation Protocol, SIP). Раздел также посвящен исследованию механизмов контроля перегрузок SIP-серверов. Представлены типовые задачи обнаружения перегрузок, требования к механизмам контроля согласно документам Инженерного совета интернет (Internet Engineering Tasks Force, IETF) и их классификация. Исследован основной механизм контроля перегрузок SIP-серверов – пороговое управление длиной очереди, т.н. «гистерезисное управление» нагрузкой. Показано, что модель SIP-сервера для анализа особенностей управления нагрузкой в сети серверов протокола установления сессий может быть представлена в виде

¹ Башарин Г.П. Математическая теория телетрафика и ее приложения к анализу мультисервисных сетей связи следующих поколений / Г.П. Башарин, Ю.В. Гайдамака, К.Е. Самуйлов // Автоматика и вычислительная техника. Латвия, Рига: Институт электроники и вычислительной техники Латвийского университета, 2013. №2. С. 11-21.

однолинейной СМО с конечной очередью и гистерезисным управлением нагрузкой. В случае приоритизации обслуживания сервером сообщений протокола SIP применяется модель двухпоточковой поллинговой СМО конечной емкости с пороговым управлением нагрузкой для шлюзовой и исчерпывающей дисциплин обслуживания.

Раздел 1.5 посвящен исследованию особенностей построения вероятностных моделей одноранговых сетей – как пиринговых сетей на базе протоколов типа BitTorrent, так и одноранговых сетей прямого взаимодействия беспроводных устройств D2D на базе технологии LTE. Показано, что для построения моделей буферизации данных в потоковых P2P-сетях применим аппарат дискретных конечных ц.м. Для задачи анализа характеристик интерференции в сети прямого взаимодействия беспроводных устройств D2D, в т.ч. функции плотности с.в. отношения сигнал/интерференция пары взаимодействующих устройств, применимы методы стохастической геометрии, которая играет большую роль в создании теоретических основ современных беспроводных сетей ².

Глава 1 написана на основании публикаций автора [1, 6, 9, 12, 22, 24, 25, 29-31, 36].

В главе 2 выполнен обзор основных результатов автора в области моделирования мультисервисных сетей с мультипликативным распределением вероятностей – от сетей с многоадресными соединениями (*разделы 2.1 и 2.2*), модели обслуживания трафика межмашинных взаимодействий в сети LTE (*раздел 2.3*) и до модели обслуживания трафика в оптической пассивной сети (*раздел 2.4*).

В первой главе диссертации решена задача построения и анализа модели мультисервисной сети с многоадресными соединениями, где рассматривалась только одна из дисциплин (дисциплина P_1) обслуживания многоадресного трафика. В соответствии с этой дисциплиной «прозрачного» обслуживания, период занятости прибора определяет первая из поступивших заявок, а в момент окончания ее обслуживания систему одновременно покидают все заявки, освобождая все занятые ресурсы. Такая дисциплина описывает сценарий подключения пользователей к сетевой игре или видеоконференции, а также получение пользователями услуги видео по запросу. Во второй главе исследована дисциплина P_2 , при которой заявки, обсуживаясь одновременно на одном приборе, покидают систему независимо друг от друга. Длительность обслуживания каждой заявки имеет экспоненциальное распределение с тем же параметром $\mu_{mps} > 0$. Эта дисциплина описывает сценарий подключения пользователей к просмотру канала вещательного телевидения. Как и в главе 1,

² François Baccelli and Bartłomiej Błaszczyszyn (2010), "Stochastic Geometry and Wireless Networks", in 2 volumes. Foundations and Trends® in Networking. Vol. 3: No. 3–4, pp. 249-449, Vol. 4: No. 1–2, pp. 1-312.

м.п. $X_{mps}(t)$ описывает поведение (m, p, s) -пути на множестве $\{0,1\}$. Для введенных дисциплин сформулирована и доказана теорема, обобщающая теорему 1.1.

Теорема 2.1. Стационарное распределение м.п. $\{X_{mps}(t), t \geq 0\}$ имеет мультипликативный вид

$$\pi(\mathbf{x}) = \pi(\mathbf{0}) \cdot \prod_{s \in \mathcal{S}} \prod_{p \in \mathcal{P}_s} \prod_{m \in \mathcal{M}_s} \alpha_{mps}^{x_{mps}}, \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}, \quad (2.1)$$

$$\text{где } \left(\pi(\mathbf{0}) \right)^{-1} = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \prod_{s \in \mathcal{S}} \prod_{p \in \mathcal{P}_s} \prod_{m \in \mathcal{M}_s} \alpha_{mps}^{x_{mps}}, \quad \alpha_{mps} = \begin{cases} \rho_{mps}, & \text{для дисциплины } P_1, \\ e^{\rho_{mps}} - 1, & \text{для дисциплины } P_2. \quad \blacksquare \end{cases}$$

В диссертации получены рекурсивные алгоритмы для расчета нормирующей

константы $G = \left(\pi(\mathbf{0}) \right)^{-1}$, как наиболее трудоемкой с точки зрения вычислений

характеристики, и для других вероятностно-временных характеристик как для модели с многоадресным трафиком, так и для модели с двумя типами трафика – многоадресным и одноадресным.

Полученный результат оказался применим и для других моделей мультисервисных сетей. В том числе это показано для модели оптических абонентских узлов, которые используют перенастраиваемые лазеры при передаче данных к оптическому линейному терминалу в выделенном диапазоне длин волн. Оптические сети играют значительную роль в развитии широкополосных систем передачи информации в сетях последующих поколений. В модели рассматривается L абонентских узлов и $W \leq L$ длин волн, а м.п. $X(t)$ описывает состояние абонентских узлов на множестве состояний

$$\Omega := \left\{ \mathbf{n} : n_l \in \{0,1\}, \sum_{l=1}^L n_l \in \{0,1,\dots,W\}, W \leq L \right\}, \text{ где } n_l = 1, \text{ если узел активен, т.е.}$$

передает данные на выделенной ему длине волны. Показано, что стационарное

распределение м.п. $X(t)$ является мультипликативным, т.е. $p(\mathbf{n}) = G^{-1} \prod_{l=1}^L \rho_l^{n_l}$,

а нормирующая константа $G = \sum_{w=0}^W g(L, w)$ вычисляется рекурсивно:

$$g(l, w) = \begin{cases} 0, & l = 0, \quad w = \overline{1, W}, \\ 1, & l = \overline{0, L}, \quad w = 0, \\ g(l-1, w) + \rho_l g(l-1, w-1), & l = \overline{1, L}, \quad w = \overline{1, W}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Рекурсия, представленная в формуле (2.2), была получена автором как следствие из теоремы 1.1.

В мультисервисных сетях преобладающим является трафик, передаваемый по принципу best effort, который при моделировании называют эластичным

трафиком. Существенной сложностью моделирования систем с эластичным трафиком является отсутствие мультипликативного решения при его комбинации с другими типами трафика. Причина заключается в том, что модель с эластичным трафиком утрачивает свойство независимости обслуживаемых потоков, поскольку эластичные заявки занимают все приборы, оставшиеся не занятыми обслуживанием заявок потоков других типов. Однако при ограничениях на объем занимаемых эластичным трафиком ресурсов в ряде случаев удастся получить мультипликативное решение. В диссертации построена математическая модель соты беспроводной сети, где радиоресурсы выделяются диапазонами фиксированного размера. Для передачи блока данных межмашинных взаимодействий (М2М-трафик) в модели требуется минимум b единиц ресурса (приборов). В соте также предоставляется услуга передачи потокового видео (Н2Н-трафик), требующая d приборов для обслуживания одной потоковой заявки. В модели используются следующие обозначения: C общее число приборов; C_{M2M} число приборов, доступных для эластичных заявок; $c(m)$ число приборов, обслуживающих эластичные заявки, если их в системе m ; c фиксированный размер диапазона (число приборов), выделяемого для эластичных заявок; M максимальное число эластичных заявок в одном таком диапазоне. В предположениях о пуассоновском входящем потоке и экспоненциальном обслуживании систему описывает м.п. $X(t) = (m(t), n(t))$ над пространством состояний $\mathcal{X} = \{(m, n) \geq \mathbf{0} : n \cdot d \leq C - c(m), m \cdot b \leq C_{M2M}\}$, где $m(t)$ число эластичных и $n(t)$ число потоковых заявок, обслуживаемых в момент $t \geq 0$.

Теорема 2.2. Стационарное распределение м.п. $X(t)$ имеет мультипликативный вид:

$$p(m, n) = G^{-1}(\mathcal{X}) \cdot \left(\frac{\rho}{M \cdot b}\right)^m \cdot \left(\prod_{i=1}^m \left[\frac{i}{M}\right]\right)^{-1} \cdot \frac{a^n}{n!}, \quad (m, n) \in \mathcal{X}, \quad (2.3)$$

где $G(\mathcal{X}) = \sum_{(m, n) \in \mathcal{X}} \left(\frac{\rho}{M \cdot b}\right)^m \cdot \left(\prod_{i=1}^m \left[\frac{i}{M}\right]\right)^{-1} \cdot \frac{a^n}{n!}$ – нормирующая константа. ■

Для всех исследованных в главе 2 моделей проведен анализ их вероятностно-временных характеристик, в том числе вероятностей блокировок запросов на установление соединений с различными типами передаваемого по ним трафика, а также разработаны рекурсивные алгоритмы, понижающие размерность вычислительных задач, получение которых возможно в силу мультипликативности распределений соответствующих моделей. Проведен численный анализ показателей эффективности исследуемых систем.

Глава 2 диссертационной работы написана на основании публикаций автора [1, 2, 6, 12, 22, 25, 31].

В двух первых главах диссертационной работы исследованы модели обслуживания соединений в мультисервисной сети, а в главах 3 и 4 исследуются модели систем управления установлением этих соединений, т.е. систем сигнализации³, как ключевого элемента телекоммуникационной инфраструктуры. Без теоретических исследований систем сигнализации мультисервисных сетей невозможно было бы дать оценку важнейшему показателю эффективности – времени установления соединения, а также составляющим его задержкам в узлах сети, а разработанный комплекс моделей не обладал бы свойством полноты относительно объекта исследований.

В главе 3 разработаны модели систем и сетей массового обслуживания установления соединений в мультисервисных сетях. Показано, что принципы построения моделей систем управления установлением соединений по протоколу SIP в мультисервисных сетях базируются на фундаментальных результатах, полученных для системы сигнализации по общему каналу (ОКС7) в трудах известных российских и зарубежных ученых (Г.П. Башарин, К.Е. Самуйлов, А.Е. Кучерявый, P.J. Kuhn, A. Modaresi и др.).

В *разделе 3.1* выполнен аналитический обзор особенностей построения и методов исследования математических моделей систем сигнализации, а также уточнена и раскрыта постановка задачи исследований. В *разделе 3.2* построена модель установления соединения в подсистеме передачи мультимедийных сообщений (IP multimedia subsystem, IMS) мультисервисной сети, которая предложена консорциумом 3GPP в качестве базы для внедрения и поддержки широкого набора услуг в мультисервисных сетях с сигнализацией по протоколу установления сессий SIP. Подсистема IMS отвечает за установление и поддержание сессий пользователей, а также за предоставление услуг в режиме реального времени, например, услуги цифрового вещательного телевидения IPTV, при обеспечении нормированного уровня качества обслуживания QoS и качества восприятия QoE. Мультимедийные услуги в режиме реального времени существенно меняют характеристики трафика, как пользовательского, так и сигнального, что требует новых моделей и методов для оценки основных показателей качества предоставления услуг. Проведен сравнительный анализ разработанных методов оценки времени установления соединения на базе подсистемы IMS. Методы анализировались с помощью моделей экспоненциальной СеМО, однородной неэкспоненциальной СеМО и многофазной СМО с фоновыми заявками. Для оценки была выбрана услуга предоставления видео по запросу, как одна из наиболее чувствительных к показателям качества восприятия услуг. Архитектура исследуемого комплекса IPTV включает следующие функциональные блоки: оборудование пользователя; магистральную сеть; ядро подсистемы IMS, реализующей функцию посредника, функцию обслуживания и функцию запроса; сервер

³ Самуйлов К.Е. Методы анализа и расчета сетей ОКС 7 / К.Е. Самуйлов // М.: Изд. РУДН, 2002. 291 с.

приложений; сервер предоставления запрашиваемых данных. Согласно международным стандартам время установления соединения не должно превышать 2 с. Для оценки времени установления соединения построена математическая модель сети, состоящая из 7 узлов. Сообщения, передаваемые между узлами, соответствуют в математической модели заявкам, а функциональные блоки IMS – узлам СеМО. С помощью построенной модели получена оценка одной основной характеристик качества восприятия – среднего времени установления соединения в подсистеме IMS.

Построена модель неэкспоненциальной СеМО (рис. 1), которая дает возможность анализа времени установления соединения для произвольного распределения длительности обслуживания с заданными средним и коэффициентом вариации (к.в.) в каждом узле.

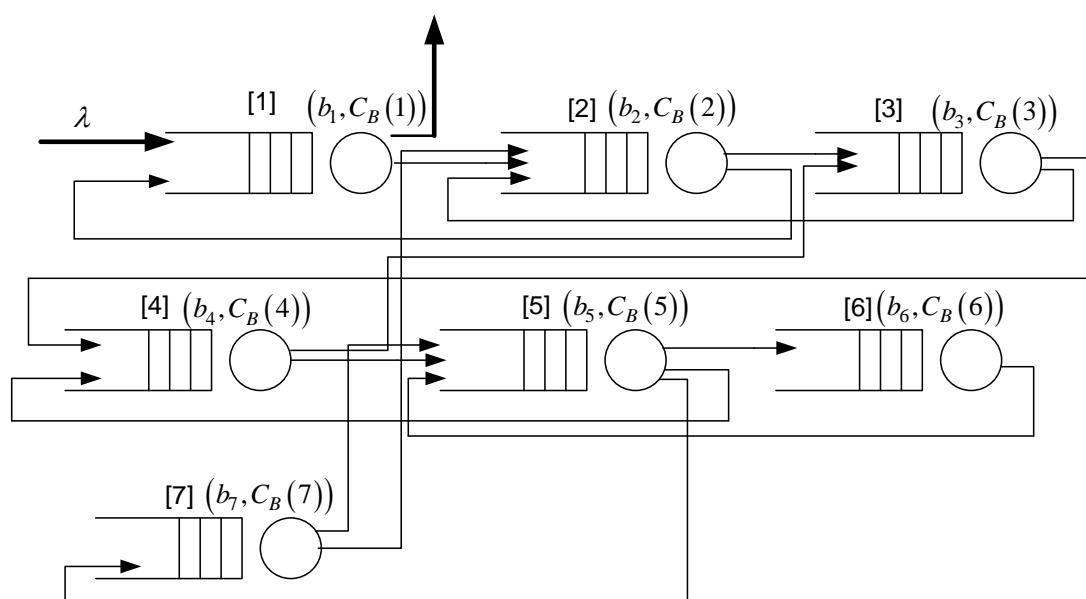


Рис. 1. Модель однородной неэкспоненциальной СеМО

Применяя для оценки времени пребывания заявки в СеМО т.н. «метод Университета дружбы народов (УДН)»⁴, из системы линейных алгебраических уравнений для известных значений среднего b_i и к.в. $C_B(i)$ длительности обслуживания в узлах, интенсивности λ и к.в. входящего потока $C_A(0,1)$, а также элементов маршрутной матрицы Θ можно вычислить к.в. $C_A(i)$.

Далее с помощью приближенной формулы Крамера и Лангенбах-Бельца определено среднее время ожидания заявки в i -м узле. Среднее время ожидания заявок в узлах неэкспоненциальной СеМО может быть вычислено по приближенной формуле

⁴ Башарин Г.П. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А Коган // М.: Наука, 1989. – 336 с.

$$\omega_i \approx \frac{\rho_i b_i}{2(1-\rho_i)} [C_A^2(i) + C_B^2(i)] g(\rho_i, C_A(i), C_B(i)), \quad (3.1)$$

$$g(\rho_i, C_A(i), C_B(i)) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-2(1-\rho_i)(1-C_A^2(i))^2}{3\rho_i(C_A^2(i) + C_B^2(i))}\right), & C_A(i) \leq 1, \\ \exp\left(\frac{-(1-\rho_i)(C_A^2(i)-1)}{C_A^2(i) + 4C_B^2(i)}\right), & C_A(i) > 1. \quad \blacksquare \end{cases} \quad (3.2)$$

Разработан метод оценки времени установления соединения в виде многофазной СМО, который позволяет найти не только среднее значение, но и квантиль времени установления соединения. Процедура установления соединения представлена на рис. 2 как модель K -фазной СМО с фоновым трафиком, который создают сообщения, обслуживаемые в том же узле сети.

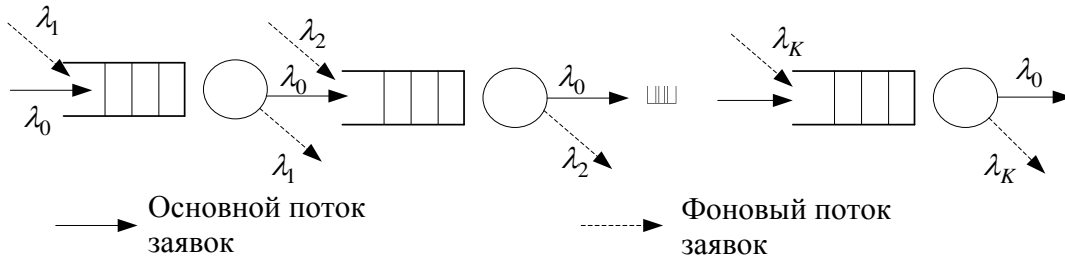


Рис. 2. Модель многофазной СМО с фоновым трафиком

Обозначим b_k и d_k среднее время обслуживания заявок основного и фонового потока на k -й фазе СМО. Интенсивность нагрузки и к.в. длительности обслуживания на k -й фазе определяются формулами

$$\rho_k = \lambda_0 b_k + \lambda_k d_k, \quad C_k^2 = \frac{(\lambda_0 + \lambda_k)(\lambda_0 b_k^{(2)} + \lambda_k d_k^{(2)})}{(\lambda_0 b_k^{(1)} + \lambda_k d_k^{(1)})^2} - 1, \quad k = 1, \dots, K. \quad (3.3)$$

Время ожидания начала обслуживания на k -й фазе, полученное из формулы Поллачека-Хинчина, и время пребывания заявки в многофазной СМО с фоновым трафиком, соответствующее времени установления соединения, вычисляются по формулам

$$\omega_k = \frac{\rho_k^2 (1 + C_k^2)}{2(\lambda_0 + \lambda_k)(1 - \rho_k)}, \quad k = 1, \dots, K, \quad \Delta = \sum_{k=1}^K (\omega_k + b_k). \quad (3.4)$$

Пусть $\alpha_k(s)$ преобразование Лапласа-Стилтьеса (п.л.с.) интервалов между поступлениями заявок и $\beta_k(s)$ п.л.с. длительности обслуживания заявок на k -й фазе.

Теорема 3.1. Квантиль уровня ψ времени пребывания заявки в многофазной СМО вычисляется по формуле

$$Q_\psi = q_\psi + \sum_{k=1}^K \left(\frac{\ln(\gamma_k \omega_k)}{\gamma_k} + b_k \right), \quad (3.5)$$

где q_ψ является единственным положительным корнем уравнения $1 - \psi = \sum_{k=1}^K e^{-\gamma_k q_\psi} (\gamma_k q_\psi)^k / k!$, а параметр γ_k является единственным положительным корнем уравнения $\alpha_k(\gamma_k) \beta_k(-\gamma_k) = 1$. ■

Проанализированы три метода оценки времени установления соединения для экспоненциальной и детерминированной длительностей обслуживания. Показаны преимущества метода для модели в виде многофазной СМО с фоновым трафиком, который имеет наибольшую точность в расчетах (менее 7 % по сравнению с результатами имитационного моделирования) и возможность вычисления квантиля времени установления соединения.

В разделе 3.3 разработана модель сервера, обслуживающего сигнальный трафик с приоритизацией сообщений, в виде марковской системы поллинга конечной емкости с пороговым управлением нагрузкой и ненулевым временем переключения между очередями при шлюзовой и исчерпывающей дисциплинах обслуживания (рис. 3).

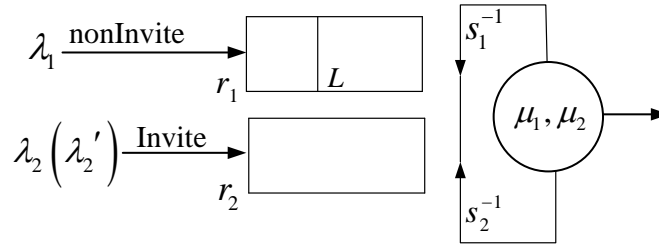


Рис. 3. Система поллинга конечной емкости с пороговым управлением

Для модели сервера с исчерпывающей дисциплиной обслуживания введен м.п. $\eta(t) = (q(t), n_1(t), n_2(t))$, где $q(t)$ номер обслуживаемой очереди, $n_i(t)$ число заявок в i -й очереди в момент $t \geq 0$. М.п. $\eta(t)$ определен на пространстве состояний $\mathcal{X} = \{(q(t), n_1(t), n_2(t)): q = 1, 2; n_1 = 0, \dots, r_1; n_2 = 0, \dots, r_2\}$. Пороговое управление нагрузкой включается в момент, когда длина очереди приоритетных заявок превышает порог L , и заключается в снижении интенсивности поступления неприоритетных заявок до уровня $\lambda_2' < \lambda_2$. В модели учтена случайная длительность переключения к i -очереди, которая распределена по экспоненциальному закону со средним s_i . Пространство состояний \mathcal{X} разделено на два подпространства, причем подпространство \mathcal{X}_1 включает состояния перегрузки, в которых число приоритетных заявок превышает порог L :

$$\mathcal{X}_0 = \{(q, n_1, n_2): q = 1, 2; n_1 = 0, \dots, L; n_2 = 0, \dots, r_2\},$$

$$\mathcal{X}_1 = \{(q, n_1, n_2): q = 1, 2; n_1 = L+1, \dots, r_1; n_2 = 0, \dots, r_2\}.$$

Показано, что стационарное распределение м.п. $\eta(t)$ удовлетворяет системе уравнений равновесия, которая решается численно методом LU-разложения. При этом для представления матрицы интенсивностей переходов в блочном трехдиагональном виде достаточно определить лексикографический порядок в отношении предшествования $(q', n'_1, n'_2) \prec (q'', n''_1, n''_2)$ состояний $z' = (q', n'_1, n'_2)$ и $z'' = (q'', n''_1, n''_2)$, которое верно при выполнении условия:

$$\left(\left((n'_1 + n'_2) < (n''_1 + n''_2) \right) \vee \left((n'_1 + n'_2) = (n''_1 + n''_2) \wedge \left((q' < q'') \vee \left((q' = q'') \wedge \left((n'_1 < n''_1) \vee \left((n'_1 = n''_1) \wedge (n'_2 < n''_2) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (3.6)$$

Лемма 3.1.

1. При выполнении условий (3.6) матрица интенсивностей переходов м.п. $\eta(t)$ представима в блочном трехдиагональном виде

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_0 & \mathbf{U}_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{L}_1 & \mathbf{D}_1 & \mathbf{U}_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L}_2 & \mathbf{D}_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{D}_{R-1} & \mathbf{U}_{R-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{L}_R & \mathbf{D}_R \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

имеет размерность $|\mathcal{X}| = 2(r_1 + 1)(r_2 + 1)$, а блоки \mathbf{D}_n , \mathbf{U}_n и \mathbf{L}_n включают состояния $z' = (q', n'_1, n'_2): n = n'_1 + n'_2, n = 0, \dots, R$.

2. Элементы диагональных блоков \mathbf{D}_n вычисляются по формулам

$$\mathbf{D}_n = (d_n(z', z''))_{n=0, \dots, R} = \begin{cases} s_2^{-1}, & \text{если } q' = 1, q'' = 2, n'_1 = 0, n'_2 = n''_2; \\ s_1^{-1}, & \text{если } q' = 2, q'' = 1, n'_1 = n''_1, n'_2 = 0. \end{cases}$$

Элементы наддиагональных и поддиагональных блоков \mathbf{U}_n и \mathbf{L}_n вычисляются по формулам

$$\mathbf{U}_n = (u_n(z', z''))_{n=0, \dots, R} = \begin{cases} \lambda_1, & \text{если } q' = q'', n''_1 = n'_1 + 1, n'_2 = n''_2; \\ \lambda_2, & \text{если } q' = q'', n'_1 = n''_1, n'_1 \leq L, n'_2 + 1 = n''_2; \\ \lambda'_2, & \text{если } q' = q'', n'_1 = n''_1, n'_1 > L, n'_2 + 1 = n''_2. \end{cases}$$

$$\mathbf{L}_n = (l_n(z', z''))_{n=0, \dots, R} = \begin{cases} \mu_1, & \text{если } q' = q'' = 1, n''_1 = n'_1 - 1, n'_2 = n''_2; \\ \mu_2, & \text{если } q' = q'' = 2, n'_1 = n''_1, n'_2 = n''_2 - 1. \end{cases} \quad \blacksquare$$

Для вычисления характеристик шлюзовой дисциплины применен тот же подход, в заключение проведен сравнительный анализ исчерпывающей и шлюзовой дисциплин марковских систем поллинга. Показано преимущество

исчерпывающей дисциплины обслуживания по следующим показателям эффективности: 1) меньшее время ожидания начала обслуживания заявок в приоритетной очереди для поллинговой модели с ненулевой длительностью переключения; 2) меньшее среднее число заявок в приоритетной очереди и меньшая вероятность пребывания в состояниях перегрузки для поллинговой модели конечной емкости с пороговым управлением.

Глава 3 диссертационной работы написана на основании публикаций автора [2, 11, 13, 15, 18, 30, 32, 34, 39].

Четвертая глава диссертационной работы посвящена построению и методам анализа модели гистерезисного управления нагрузкой SIP серверов в мультисервисной сети.

В *разделе 4.1* проведен обзор методов управления сигнальной нагрузкой в мультисервисных сетях и показано, что применим метод управления нагрузкой, разработанный в рекомендациях Международного союза электросвязи для протоколов ОКС7. Обработка перегрузки в ОКС7 включает в себя два этапа – обнаружение перегрузки и действия по ее снижению / предотвращению. Для обнаружения перегрузки производится контроль числа сообщений в очереди буфера передачи, а действия по снижению / предотвращению перегрузки заключаются в ограничении поступающей нагрузки. В *разделе 4.2* исследованы особенности механизмов контроля перегрузок в сети серверов протокола установления сессий и показано, что гистерезисное управление нагрузкой является одним из наиболее эффективных решений, что, в свою очередь, требует разработки адекватных математических моделей.

В *разделе 4.3* построена базовая математическая модель управления нагрузкой в сети SIP-серверов в виде СМО $M(\lambda, p) | M | 1 | \langle L, H \rangle | B$ согласно обозначениям Башарина-Кендалла, где B объем буферного накопителя, L порог нижнего уровня, H порог верхнего уровня контроля перегрузок. Показано, что метод гистерезисного управления сигнальной нагрузкой предполагает использование порогов трех типов – порог H обнаружения перегрузки, порог L снижения перегрузки и порог B сброса нагрузки. При достижении длиной очереди порога обнаружения перегрузки производится снижение поступающей нагрузки, при этом при усугублении перегрузки и достижении длиной очереди порога сброса нагрузки производится сброс поступающей нагрузки. Во избежание осцилляций, при падении длины очереди возврат к нормальной нагрузке происходит не сразу после снижения наполненности буфера ниже значения порога обнаружения перегрузки, а лишь после пересечения длиной очереди порога снижения перегрузки. Описанный механизм соответствует гистерезисному управлению нагрузкой. На рис. 4 показана качественная зависимость интенсивности $\lambda(s, n)$ потока сигнальных сообщений от длины n очереди в буфере передачи при процедуре

гистерезисного управления. Здесь s статус перегрузки: $s=0$ – нормальная нагрузка, $s=1$ – перегрузка, $s=2$ – сброс нагрузки.

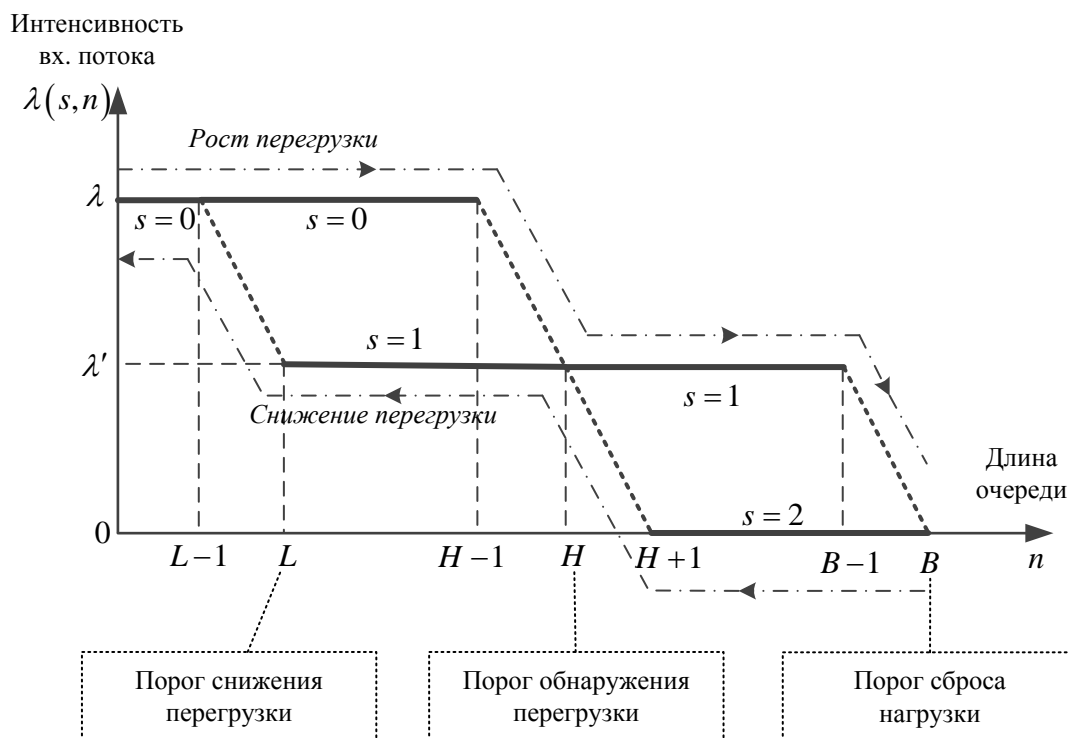


Рис. 4. Принцип гистерезисного управления нагрузкой

При обнаружении перегрузки при длине очереди $n = H$ нормальное значение λ интенсивности нагрузки снижается до величины $\lambda' < \lambda$. Если длина очереди достигает значения $n = B$, происходит сброс нагрузки, т.е. $\lambda(s, n) = 0$ для $n \geq B$. При последующем уменьшении очереди до значения $n \leq H$ величина интенсивности нагрузки восстановится до значения λ' и сохранится до момента достижения длиной очереди значения $n = L$, когда значение интенсивности нагрузки вернется к нормальному уровню λ . Проведенные исследования показали, что именно этот механизм может быть положен в основу принципов управления перегрузками в сети SIP-серверов.

Согласно проведенному обзору литературы, известен ряд статей, где изложены подходы к построению моделей функционирования SIP-серверов с пороговым управлением в условиях перегрузок. Но практически во всех известных источниках, включая стандарты Инженерного совета интернета IETF, в явном виде отсутствует механизм гистерезисного управления нагрузкой, а все численные результаты получены либо с помощью измерений, либо с использованием имитационных моделей. Поэтому для математического анализа параметров управления нагрузкой в сети SIP-серверов в диссертации предложено применять СМО с гистерезисным управлением нагрузкой.

График интенсивности поступающего на СМО пуассоновского потока $\lambda(s, n)$ изображен на рис. 4, где $s \in \{0, 1, 2\}$ статус перегрузки. Предполагается,

что в состоянии нормальной загрузки система может обрабатывать поток интенсивности λ , а при достижении очередью значения H порога верхнего уровня контроля перегрузок нагрузка уменьшается до величины $\lambda' = p\lambda$, где $1-p$ доля сброшенных сообщений.

Утверждение 4.1. Множество состояний СМО $M(\lambda, p) | M | 1 | \langle L, H \rangle | B$ представимо в виде $\mathcal{Y} = \mathcal{Y}_0 \cup \mathcal{Y}_1 \cup \mathcal{Y}_2$, где $\mathcal{Y}_0 = \{(s, n) : s = 0, 0 \leq n \leq H-1\}$ множество состояний нормальной нагрузки, $\mathcal{Y}_1 = \{(s, n) : s = 1, L \leq n \leq B-1\}$ множество состояний перегрузки и $\mathcal{Y}_2 = \{(s, n) : s = 2, H+1 \leq n \leq B\}$ множество состояний сброса нагрузки, а интенсивность поступающего на СМО потока имеет вид

$$\lambda(s, n) = \begin{cases} \lambda, & (s, n) \in \mathcal{Y}_0, \\ p\lambda, & (s, n) \in \mathcal{Y}_1, \\ 0, & (s, n) \in \mathcal{Y}_2. \quad \blacksquare \end{cases} \quad (4.1)$$

Таким образом, сформулированным выше утверждением 4.1 построена базовая модель гистерезисного управления нагрузкой в сети SIP-серверов, которая была использована в ряде работ, в том числе в работах автора диссертационной работы. Для базовой модели стационарное распределение вероятностей состояний получено в аналитическом виде.

Лемма 4.1. Стационарные вероятности $p_{s,n}$ марковского процесса $Y(t)$ на множестве состояний $\mathcal{Y} = \mathcal{Y}_0 \cup \mathcal{Y}_1 \cup \mathcal{Y}_2$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} p_{0,n} &= \rho^n p_{0,0}, \quad n = 0, \dots, L-1, \\ p_{0,n} &= \frac{\rho^n - \rho^H}{1 - \rho^{H-L+1}} p_{0,0}, \quad n = L, \dots, H-1, \\ p_{1,n} &= \frac{\rho^H (1 - \rho) (1 - (\rho')^{n-L+1})}{(1 - \rho') (1 - \rho^{H-L+1})} p_{0,0}, \quad n = L, \dots, H, \\ p_{1,n} &= \frac{\rho^H (1 - \rho) ((\rho')^{n-H} - (\rho')^{B-H} - (\rho')^{n-L+1} + (\rho')^{B-L+1})}{(1 - \rho') (1 - ((\rho')^{B-H})) (1 - \rho^{H-L+1})} p_{0,0}, \quad n = H+1, \dots, B-1, \\ p_{2,n} &= \frac{\rho^H (1 - \rho) ((\rho')^{B-H} - (\rho')^{B-H+1} - (\rho')^{B-L+1} + (\rho')^{B-L+2})}{(1 - \rho') (1 - (\rho')^{B-H}) (1 - \rho^{H-L+1})} p_{0,0}, \quad n = H+1, B, \end{aligned}$$

где $\rho = \lambda / \mu$, $\rho' = \lambda' / \mu$ и $p_{0,0}$ определяется из условия нормировки. \blacksquare

На основе леммы 4.1 разработан рекурсивный алгоритм расчета стационарных вероятностей марковского процесса $Y(t)$.

Важнейшей характеристикой управления SIP-сервером является время его пребывания в состоянии перегрузки, которое подлежит минимизации. Обозначим τ_{12} с.в. времени пребывания заявок в множестве перегрузки $\mathcal{Y}_2 = \mathcal{Y}_1 \cup \mathcal{Y}_2$ от момента, когда м.п. $Y(t)$ вошел в множество \mathcal{Y}_2 , т.е. в состояние $(1, H)$, до момента, когда процесс в первый раз вернулся в множество \mathcal{Y}_0 состояний нормальной нагрузки, т.е. в состояние $(0, L-1)$. В реальной технической системе с.в. τ_{12} соответствует времени функционирования SIP-сервера в режиме перегрузки, когда управление включено и происходит просеивание входящего потока сообщений. Величина τ_{12} называется временем возврата в множество состояний нормальной нагрузки. Интерес представляют характеристики с.в. τ_{12} – начальные моменты и квантиль уровня 0.95, для вычисления которой необходимо иметь ф.р. Введем процесс $\hat{Y}(t)$ как сужение процесса $Y(t)$ на пространство состояний $\hat{\mathcal{Y}} = \mathcal{Y}_2 \cup \{(0, L-1)\}$ и обозначим $\hat{\mathbf{p}}(t) = (\hat{p}_{(s,n)}(t))_{(s,n) \in \hat{\mathcal{Y}}}$ распределение $\hat{Y}(t)$ в момент $t \geq 0$.

Утверждение 4.2. Функция распределения (ф.р.) случайной величины τ_{12} имеет

$$\text{вид } F_{\tau_{12}}(t) = \hat{p}_{(0, L-1)}(t) \text{ и } E\tau_{12} = \int_0^{\infty} t \frac{d}{dt} \hat{p}_{(0, L-1)}(t) dt. \blacksquare$$

Раздел 4.3 диссертационной работы также посвящен численному анализу гистерезисного управления нагрузкой. Одна из основных проблем заключается в минимизации среднего времени $E\tau_{12}(L, H)$ возврата из множества состояний перегрузки в множество состояний нормальной нагрузки относительно выбора порогов L и H , которые являются основными параметрами гистерезисного управления нагрузкой. Решалась следующая задача:

$$E\tau_{12}(L, H) \rightarrow \min \tag{4.2}$$

$$R1: P(\mathcal{Y}_1) \leq \gamma_1; R2: P(\mathcal{Y}_2) \leq \gamma_2; R3: M\tau \geq \gamma_3,$$

где γ_1, γ_2 ограничения на вероятности нахождения $Y(t)$ в множествах перегрузки и сброса нагрузки соответственно, а γ_3 ограничение на среднюю длительность цикла управления τ . Задача решена численно и с помощью имитационного моделирования.

Таким образом, в разделах 4.1-4.3 получены основные результаты для задачи моделирования контроля перегрузок SIP-серверов. Сформулированы принципы гистерезисного управления, введено пороговое управление нагрузкой и определены теоретические основы анализа параметров управления на базе марковской модели СМО типа $M(\lambda, p) | M | 1 | \langle L, H \rangle | B$. Эти результаты были

положены в основу постановок задач работ^{5,6}, где группой авторов исследовано п.л.с. времени выхода системы из состояний перегрузки и проведен анализ СМО с групповым поступлением заявок, гистерезисным управлением и произвольной длительностью обслуживания.

Групповое поступление заявок является особенно актуальным для моделирования SIP-серверов, поскольку в условиях перегрузок в реальной технической системе наблюдается пачечный характер поступления сообщений типа Register и типа Notify, служащих для регистрации и подтверждения присутствия пользователя в сети. Особенности анализа СМО с групповым поступлением заявок изложены в *разделе 4.4* диссертационной работы, где также исследовано влияние вида ф.р. размера группы заявок на среднюю длину очереди и среднее время ожидания обслуживания. Анализ проведен для пяти распределений размера группы – логарифмического, геометрического, Ципфа, детерминированного и дискретного равномерного распределений. Показано, что существует статистически достоверная зависимость вероятностно-временных характеристик модели от расстояний между распределениями размера группы заявок в норме С, т.е. $\rho_{ij}^{C,f} = \max_k |f_i(k) - f_j(k)|$. На основе проведенного анализа были найдены коэффициенты эластичности характеристик модели в зависимости от расстояния между распределениями размера группы заявок и получены поправочные коэффициенты для оценки этих характеристик при помощи заданного распределения. Исследования позволили сформулировать важный практический результат, который заключается в том, что при моделировании группового поступления заявок все расчеты можно выполнять для равномерного распределения размера группы с учетом поправочных коэффициентов. Например, для геометрического распределения с максимальным размером группы 8 заявок средняя длина очереди определяется формулой $N \approx 0,14(1 - \ln \rho) N_0(\rho)$, где $N_0(\rho)$ средняя длина очереди для равномерного распределения размера группы и $\rho \in [0,1; 0,9]$ нагрузка на систему.

Глава 4 диссертационной работы написана на основании публикаций автора [9, 10, 16, 17, 19, 20, 23, 28, 33, 35].

Глава 5 диссертационной работы посвящена разработке основных принципов построения моделей для анализа показателей эффективности одноранговых сетей, функционирующих на базе протоколов типа BitTorrent.

⁵ Гайдамака Ю.В. Распределение времени выхода из множества состояний перегрузки в системе $M|M|1|<L,H>|<H,R>$ с гистерезисным управлением нагрузкой / Ю.В. Гайдамака, А.В. Печинкин, Р.В. Разумчик, А.К. Самуйлов, К.Е. Самуйлов, И.А. Соколов, Э.С. Сопин, С.Я. Шоргин. // Информатика и ее применения, 2013. Т. 7. Вып. 4. С. 20-33.

⁶ Gaidamaka Yu. Analysis of $M|G|1|R$ queue with batch arrivals and two hysteretic overload control policies / Yu. Gaidamaka, A. Pechinkin, R. Razumchik, K. Samouylov, E. Sopin // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2014. Vol. 24. No. 3. Pp. 519-534.

Такие сети в литературе принято называть одноранговыми пиринговыми сетями и обозначать P2P-сети.

В *разделе 5.1* исследованы особенности построения моделей P2P-сетей и дана классификация этих сетей, для каждого класса определены его показатели эффективности. Показано, что основным показателем эффективности функционирования файлообменных сетей является время загрузки файла (latency), а в потоковых сетях основными показателями являются задержка начала воспроизведения (startup delay), вероятность непрерывного воспроизведения (playback continuity) и вероятность состояния всеобщей передачи (universal streaming).

Раздел 5.2 посвящен построению и анализу модели одноранговой сети вещательного телевидения, P2PTV-сети. Исследован метод построения модели сети с потоковым трафиком в виде экспоненциальной однородной СеМО и построены модели с конечным и бесконечным числом пользователей, основанные на модели поведения пользователя. Предполагается, что в сети транслируется $|\mathcal{M}|=M$ ТВ-каналов для $|\mathcal{N}|=N$ пользователей, каждый из которых просматривает один из каналов. Известна ρ_m популярность m -канала

($\sum_{m=1}^M \rho_m = 1$), а также μ_m^{-1} среднее время просмотра m -канала пользователем.

Видеопоток, доступный пользователям, просматривающим m -канал, формируется из потока, раздаваемого видеосервером, и потоков, раздаваемых всеми пользователями m -канала. Обозначим s_m скорость раздачи видеопотока m -канала сервером, u_n скорость раздачи видеопотока n -пользователем, R_m скорость воспроизведения m -канала. Для вероятности π_m всеобщей передачи m -канала, представляющей собою вероятность того, что все пользователи, просматривающие m -канал, получают биты видеоданных со скоростью не ниже скорости R_m , получена формула для расчета в зависимости популярности канала. Исследована модель сети с двумя классами пользователей – с высокой скоростью u^h и с низкой $u^l < u^h$ скоростью раздачи данных. Соответствующие подмножества пользователей обозначены \mathcal{N}^h и \mathcal{N}^l , $\mathcal{N} = \mathcal{N}^h \cup \mathcal{N}^l$ и $u_n \in \{u^h, u^l\}$, $n \in \mathcal{N}$.

Событие $\mathcal{A}_m = \left\{ (x_m^h, x_m^l) : 0 \leq x_m^h \leq N^h, 0 \leq x_m^l \leq N^l, s_m + x_m^h u^h + x_m^l u^l \geq x_m R_m \right\}$ соответствует состоянию, когда все пользователи на m -канале просматривают его с требуемой скоростью R_m , где x_m^h и x_m^l число пользователей с высокой и с низкой скоростью раздачи, а $x_m = x_m^h + x_m^l$ общее число пользователей на m -канале.

Утверждение 5.1. Вероятность всеобщей передачи m -канала P2PTV-сети имеет вид

$$\pi_m = P(\mathcal{A}_m) = \sum_{x_m^h=0}^{N^h} \sum_{x_m^l=0}^{N^l} I(\mathcal{A}_m) p_m(x_m^h) p_m(x_m^l), \quad m \in \mathcal{M}, \quad (5.1)$$

где маргинальные распределения при $N^s \rightarrow \infty$, $s \in \{h, l\}$ имеют вид

$$p_m(x_m^s) = e^{-\gamma_m^s} \cdot \frac{(\gamma_m^s)^{x_m^s}}{x_m^s!}, \quad \gamma_m^s = \lim_{N^s \rightarrow \infty} N^s \rho_m(N^s), \quad m \in \mathcal{M}, \quad s \in \{h, l\}. \quad \blacksquare$$

При численном анализе состояния всеобщей передачи телевизионных каналов различной популярности рассматривался фрагмент сети, в которой транслируются $M=100$ телевизионных каналов и присутствуют $N=2000$ пользователей, при этом популярность каналов распределена по закону Ципфа с

параметрами $z \in \{0.5, 1, 1.5\}$, т.е. $\rho_m = \left(m^z \sum_{i=1}^M \frac{1}{i^z} \right)^{-1}$, таким образом, каналы

упорядочены в порядке убывания популярности. Показано, что для достижения состояния всеобщей передачи на каналах с низкой популярностью требуется присутствие в сети гораздо большего числа пользователей с высокой скоростью раздачи, чем для достижения состояния всеобщей передачи на популярных каналах.

В разделе 5.3 получена аппроксимация для упрощения расчета вероятности всеобщей передачи канала P2PTV-сети.

Теорема 5.1. Вероятность π_m всеобщей передачи m -канала в P2PTV-сети в случае $N^s \rightarrow \infty$, $s \in \{h, l\}$ аппроксимируется нормальным законом

$\pi_m \approx \Phi\left(\frac{d_m}{\sqrt{K + \varepsilon_m^2}}\right)$, где $\Phi(x)$ стандартное нормальное распределение и

$$d_m = \frac{(K - \varepsilon_m) \gamma_m^l + \delta_m}{\sqrt{\gamma_m^l}}, \quad K = \frac{\gamma_m^h}{\gamma_m^l}, \quad \delta_m = \frac{s_m}{u^h - R_m}, \quad \varepsilon_m = \frac{R_m - u^l}{u^h - R_m}. \quad \blacksquare$$

Для оценки относительной погрешности аппроксимации проведен численный анализ, показавший, что относительная погрешность аппроксимации для каналов с большой популярностью близка к нулю, а наибольшая относительная погрешность приближения наблюдается для наименее популярного канала.

В разделе 5.4 сформулирована задача расчета характеристик отношения сигнал/интерференция, как ключевого показателя эффективности функционирования беспроводной сети взаимодействующих устройств. Задача сведена к анализу взаимодействия двух пар терминалов в двух кластерах, как показано на рис. 5. Пара взаимодействующих терминалов $\langle Tx_0, Rx_0 \rangle$, для

которой рассчитываются показатели эффективности, названа целевой, а остальные пары $\langle Tx_i, Rx_i \rangle$, которые создают помехи целевой паре - интерферирующими. Расстояние между Rx_i и Tx_i обозначено R_i , а расстояние между Tx_0 и Tx_i обозначено U_i . Мощность сигнала от i -й интерферирующей пары является функцией расстояния между приемником Rx_i из целевой пары и интерферирующим передатчиком Tx_i , таким образом, она будет зависеть от расстояния между Tx_i и Rx_0 , которое обозначено D_i .

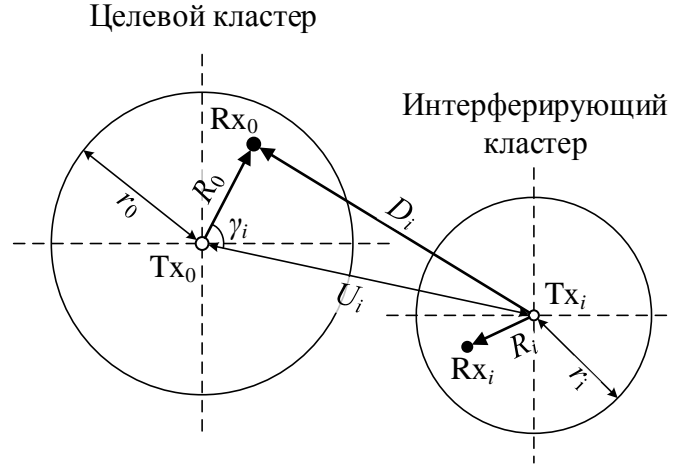


Рис. 5. Схема взаимодействия интерферирующих устройств

Рассмотрена система с одним источником интерференции. В условиях отсутствия шума искомой характеристикой является отношение сигнал/интерференция $SIR = (D_1 / R_0)^\alpha$, где α коэффициент потерь при распространении радиосигнала. Будем считать, что R_0 , U_1 и γ_1 являются с.в. с заданными ф.р. Для решения задач анализа характеристик с.в. SIR предложен метод нахождения совместной плотности распределения с.в. R_0 и D_1 .

Пусть $\xi_1 = R_0$, $\xi_2 = U_1$, $\xi_3 = \gamma_1$, $\eta_1 = D_1$ и $w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(x_1, x_2, x_3)$ совместная плотность с.в. R_0 , U_1 , и γ_1 .

Теорема 5.2. Совместное распределение с.в. R_0 и D_1 имеет вид

$$W_{\xi_1, \eta_1}(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^2 \int_{Y_{3,i}} \frac{w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(y_1, \varphi_i(y_1, y_2, y_3), y_3) \cdot y_2}{\sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2(y_3)}} dy_3, \text{ где} \quad (5.2)$$

$$\varphi_i^+(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos(y_3) + \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2(y_3)},$$

$$\varphi_i^-(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos(y_3) - \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2(y_3)}, \text{ а области интегрирования}$$

$$Y_{3,1} = Y_{3,1}^1 \cup Y_{3,1}^2 \cup Y_{3,1}^3 \text{ и } Y_{3,2} = Y_{3,2}^1 \cup Y_{3,2}^2 \text{ вычисляются по формулам}$$

$$Y_{3,1}^1 = \begin{cases} 0 \leq y_2 \leq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq 2\pi, \end{cases} \quad Y_{3,1}^2 = \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right), \end{cases}$$

$$Y_{3,1}^3 = \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 2\pi - \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right) \leq y_3 \leq 2\pi, \end{cases} \quad Y_{3,2}^1 = \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right), \end{cases}$$

$$Y_{3,2}^2 = \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 2\pi - \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right) \leq y_3 \leq 2\pi. \quad \blacksquare \end{cases}$$

Проведен численный анализ, где полученный выше метод использован для расчета характеристик с.в. SIR , например, ее математического ожидания

$$E[SIR] = \int_{0 \leq y_1 \leq r_0} \int_{y_2 \geq 0} \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^\alpha W_{\xi_1, \eta_1}(y_1, y_2) dy_2 dy_1.$$

Предложенная модель названа базовой аналитической моделью, анализ ее характеристик проведен методами стохастической геометрии. В диссертации исследовано несколько моделей взаимодействия беспроводных устройств, расположенных в двух соседних и нескольких смежных кластерах, области которых ограничены окружностями с центрами в точках расположения беспроводных устройств. При анализе моделей основное внимание уделено методам расчета характеристик с.в. SIR , поскольку отношение сигнал/интерференция имеет наибольшее влияние на показатели качества обслуживания и качества восприятия пользователями предоставляемых им телекоммуникационных услуг в беспроводной сети. Величина SIR напрямую связана со скоростью передачи, и как следствие, со спектральной эффективностью беспроводной системы и пропускной способностью сети, а кроме того определяет надежность и связность беспроводных соединений.

Раздел 5.5 диссертационной работы посвящен именно этой проблеме – анализу показателей эффективности беспроводной сети с точки зрения геометрического расположения интерферирующих устройств. Показано, что для нескольких интерферирующих устройств могут быть получены как аналитические выражения для характеристик с.в. SIR , так и приближенный метод расчета, дающие удовлетворительные с точки зрения решения инженерных задач погрешности. В том числе, получена приближенная формула для модели с шестью интерферирующими передатчиками в круглых кластерах одинакового радиуса r_0 , смежных с кластером целевого приемника. Для анализа использован метод, разработанный для базовой аналитической модели. В рассматриваемом случае расстояния U_k между центрами Tx_0 целевого и Tx_k интерферирующих кластеров равны $2r_0$ по построению. Угол γ_1 (рис. 5)

равномерно распределен на отрезке $[0; \pi/3]$, а точка Rx_0 равномерно распределена в круге с радиусом r_0 . Расстояние D_k от передатчика Tx_k до приемника Rx_0 можно найти из теоремы косинусов, т.е.

$D_k = \sqrt{R_0^2 + 4r_0^2 - 4R_0r_0 \cos(\gamma_k)}$, и тогда выражение для искомой величины запишется в виде $SIR = R_0^{-\alpha_0} / \sum_{k=1}^6 D_k^{-\alpha_k}$, где α_k заданный коэффициент потерь. Для

важного для приложений случая, когда коэффициент потерь $\alpha_k = 2$, предложена

приближенная формула для вычисления распределения с.в. $\theta = \sum_{k=1}^6 D_k^{-2}$ с

помощью нормального закона $N(\mu_\theta, \sigma_\theta)$ со значениями параметров

$\mu_\theta = 1.7262r_0^{-2}$, $\sigma_\theta = 1.0104r_0^{-2}$.

Теорема 5.3. Если с.в. $\theta = \sum_{k=1}^6 D_k^{-2}$ распределена по нормальному закону со

значениями параметров $\mu_\theta = 1.7262r_0^{-2}$ и $\sigma_\theta = 1.0104r_0^{-2}$, тогда плотность

с.в. $\psi_1 = R_0^{-2}/\theta$ имеет вид

$$W_{\psi_1}(y_1) = \begin{cases} \frac{0.463}{y_1^2} \int_{1/y_1}^6 \frac{e^{-(t-1.7262)^2/2.0418}}{t} dt, & y_1 \in [1/6; 3/2], \\ \frac{0.5717}{y_1^2}, & y_1 \in [3/2; \infty). \quad \blacksquare \end{cases} \quad (5.3)$$

Сравнение с результатами имитационного моделирования показало, что погрешность полученного приближенного значения для математического ожидания с.в. SIR составляет не более 7.8 %, а для среднеквадратического отклонения не более 3.2 %, что допустимо в инженерных расчетах на этапе оценки параметров проектируемой системы.

Глава 5 диссертационной работы написана на основании публикаций автора [3, 4, 7, 8, 21, 24, 26, 37, 38].

Заключительная глава 6 диссертационной работы посвящена построению и анализу модели буферизации данных в потоковых одноранговых сетях. Модель построена на основе анализа процесса обмена данными между пользователями в виде дискретной ц.м. с учетом задержки воспроизведения видеоданных, стратегий обмена данными в одноранговой сети, а также геолокации (местоположения) и активности пользователей.

В разделе 6.1 диссертационной работы изложены основные принципы обмена данными в потоковых P2P-сетях в объеме, необходимом для построения и анализа математических моделей, и проведен их анализ. Показано, что при

построении модели потоковой сети следует учитывать, что ограничения на время доставки порции данных имеют решающее значение.

Для наиболее общих из известных ранее случаев описаны параметры и вероятностные характеристики модели. Анализ показателей эффективности сети предложено проводить с помощью следующей модели сети, учитывающей основные аспекты ее функционирования

$$\mathcal{N} = \langle N, M, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{lag}, \mathbf{d}, \mathbf{u}, \delta \rangle, \quad (6.1)$$

где N число пользователей, M размер буфера каждого из пользователей, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha(1), \dots, \alpha(N))$ вектор вероятностей подключения пользователей к сети, $\boldsymbol{\beta} = (\beta(1), \dots, \beta(N))$ вектор вероятностей отключения пользователей от сети, $\mathbf{lag} = (lag(1), \dots, lag(N))$ вектор задержек передачи от сервера-источника потоковых мультимедийных данных, $\mathbf{d} = (d(1), \dots, d(N))$ и $\mathbf{u} = (u(1), \dots, u(N))$ вектора скоростей загрузки и раздачи пользователей соответственно, а δ применяемая в сети стратегия загрузки данных. Показателями эффективности функционирования сети являются вероятность V непрерывного воспроизведения видео потока и среднее время τ ожидания начала просмотра.

В разделе 6.2 построена модель буферизации данных в виде дискретной ц.м. с учетом задержки воспроизведения видеоданных, которая позволяет провести анализ основных показателей эффективности функционирования сети, а также получены основные соотношения для вычисления ее стационарных характеристик.

Состояние системы можно представить в виде пары $\mathbf{Z} = (\mathbf{z}(n)) = (\mathbf{a}, \mathbf{X}) = (a(n), \mathbf{x}(n))_{n=1, \dots, N}$, причем строка n матрицы $\mathbf{X} = (\mathbf{x}(n))_{n=1, \dots, N}$ соответствует состоянию буфера присутствующего в сети n -го пользователя ($\dim \mathbf{X} = N(M+1)$), матрица описывает состояние буферов всех пользователей, а $\mathbf{a} = (a(1), \dots, a(N))$ вектор индикатор присутствия пользователя в сети. Таким образом, пространство состояний системы определяется формулой $\mathcal{X} = \{0, 1\}^N \times \{0, 1\}^{N(M+1)}$ и имеет размерность $|\mathcal{X}| = 2^{N(M+2)}$.

Обозначим $\mathcal{M}^{(0)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n))$ и $\mathcal{M}^{(1)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n))$ множества номеров пустых и заполненных данными позиций в буфере n -го пользователя соответственно.

Теорема 6.1. Для сети без учета задержек передачи информации от сервера-источника данных, т.е. для случая $\mathbf{lag} = \mathbf{0}$, если $\mathcal{M}^{(0)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n)) \cap \mathcal{M}^{(1)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(h)) = \emptyset$, то номер $m_\delta(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h))$ позиции буфера для загрузки порции определяется в соответствии со стратегией загрузки $\delta \in \{\text{RF}, \text{Gr}\}$ по формуле

$$m_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h)) = \begin{cases} \min \{m : m \in \mathcal{M}^{(0)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n)) \cap \mathcal{M}^{(1)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(h))\}, & \text{если } \delta = \text{RF}; \\ \max \{m : m \in \mathcal{M}^{(0)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n)) \cap \mathcal{M}^{(1)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(h))\}, & \text{если } \delta = \text{Gr}. \blacksquare \end{cases}$$

Введем множество

$$\mathcal{M}_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h), \text{lag}(n), \text{lag}(h)) = \left(\mathcal{M}^{(0)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n)) \cap \mathcal{M}^{(\text{lag}(n), \text{lag}(h))} \right) \cap \left\{ m : m = r - \text{lag}(n) + \text{lag}(h), r \in \mathcal{M}^{(1)}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(h)) \cap \mathcal{M}^{(\text{lag}(h), \text{lag}(n))} \right\},$$

где множество $\mathcal{M}^{(\text{lag}(i), \text{lag}(j))}$ определяется формулой

$$\mathcal{M}^{(\text{lag}(i), \text{lag}(j))} = \begin{cases} \{0, 1, \dots, M - \text{lag}(j) + \text{lag}(i)\}, & \text{если } \text{lag}(i) \geq \text{lag}(j); \\ \{\text{lag}(j) - \text{lag}(i), \dots, M\}, & \text{если } \text{lag}(i) < \text{lag}(j). \end{cases}$$

Теорема 6.2. Для сети с учетом задержек передачи информации от сервера-источника данных номер $m_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h), \text{lag}(n), \text{lag}(h))$ позиции буфера для загрузки данных определяется в соответствии со стратегией загрузки $\delta \in \{\text{LF}, \text{Gr}\}$ по формуле

$$m_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h), \text{lag}(n), \text{lag}(h)) = \begin{cases} \min \{m : m \in \mathcal{M}_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h), \text{lag}(n), \text{lag}(h))\}, & \text{если } \delta = \text{LF}; \\ \max \{m : m \in \mathcal{M}_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h), \text{lag}(n), \text{lag}(h))\}, & \text{если } \delta = \text{Gr}. \blacksquare \end{cases} \quad (6.2)$$

Обозначим $\mathbf{Z}^l = (\mathbf{a}^l, \mathbf{X}^l)$ состояние сети в момент $t_l - 0$. Нетрудно убедиться, что последовательность $\{\mathbf{Z}^l\} := \{\mathbf{Z}^l, l \geq 0\}$ образует цепь Маркова над пространством состояний $\mathcal{X} = \{0, 1\}^N \times \{0, 1\}^{N(M+1)}$. При этом система переходит из одного состояния в другое согласно протоколу распределения данных в одноранговой сети с учетом буферизации данных, описанному в разделе 6.1.

Введем $\pi^l(\mathbf{Z}) = P\{\mathbf{Z}^l = \mathbf{Z}\}$ вероятность ц.м. $\{\mathbf{Z}^l\}$ на шаге l находиться в состоянии \mathbf{Z} и $\Pi^{l,l+1}(\mathbf{Z}, \mathbf{Y})$ переходную вероятность ц.м. из состояния \mathbf{Z} в состояние \mathbf{Y} на l -м шаге. Заметим, что переходные вероятности $\Pi^{l,l+1}(\mathbf{Z}, \mathbf{Y})$ зависят от номера $m_{\delta}(\mathbf{Z}, \mathbf{x}(n), \mathbf{x}(h))$ и от вероятностей α появления и β ухода пользователя из сети. Таким образом, переходные вероятности зависят от стратегии δ выбора порции данных для загрузки от другого пользователя сети, а вероятности $\pi^l(\mathbf{Z})$ удовлетворяют уравнениям Колмогорова-Чепмена:

$$\pi^{l+1}(\mathbf{Y}) = \sum_{\mathbf{Z} \in \mathcal{X}} \pi^l(\mathbf{Z}) \Pi^{l,l+1}(\mathbf{Z}, \mathbf{Y}), \quad \mathbf{Y} \in \mathcal{X}, \quad l \geq 0. \quad (6.3)$$

Зная распределение $\pi^l(\mathbf{Z})$, можно получить формулы для расчета вероятности $V(n)$ непрерывного воспроизведения видео потока, которая соответствует вероятности того, что в конце такта в M -й позиции буфера n -й пользователь имеет порцию данных для воспроизведения видео. Предельным переходом можно получить соотношение для расчета стационарной вероятности $V(n) = \sum_{\mathbf{Y} \in \mathcal{X}: \mathbf{y}(n)=\mathbf{x}(n), x(n,M)=1, a(n)=1} \pi(\mathbf{Y})$.

В разделе также получено рекурсивное соотношение для расчета стационарных вероятностей состояния буфера n -го пользователя, предоставляющее возможность рассчитать вероятность непрерывного воспроизведения. Поскольку расчет переходных вероятностей в случае большой размерности сети может быть затруднителен, то предложено использовать приближенный метод.

В *разделе 6.3* разработаны методы расчета показателей эффективности потоковой одноранговой сети. Предложен аналитический метод для расчета матрицы переходных вероятностей цепи Маркова $\{\mathbf{Z}^l\}$, что позволяет точно решать задачу вычисления показателей эффективности для случая сети малой размерности.

Определим вероятности событий, происходящих при переходе системы из состояния \mathbf{X} в состояние \mathbf{Y} : $P_{\mathbf{XY}}^s(n)$ – n -й пользователь получил порцию данных непосредственно от сервера; $P_{\mathbf{XY}}^-(n)$ – n -й пользователь не получил ни единой порции данных, ни от сервера, ни от любого другого пользователя; $P_{\mathbf{XY}}^+(n)$ – n -й пользователь успешно скачал порцию данных согласно стратегии LF. Эти вероятности вычисляются по следующим формулам:

$$P_{\mathbf{XY}}^s(n) = \frac{1}{N}, \quad P_{\mathbf{XY}}^-(n) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{h \in N \setminus \{n\}} I \left(\sum_{m \in M} (1 - S\mathbf{X}(n, m)) S\mathbf{X}(h, m) = 0 \right),$$

$$P_{\mathbf{XY}}^+(n) = \frac{1}{N-1} \times \sum_{m \in M \setminus \{0\}} \left[\mathbf{Y}(n, m) - \right. \\ \left. - S\mathbf{X}(n, m) \cdot \sum_{h \in N \setminus \{n\}} S\mathbf{X}(h, m) \cdot I \left(\sum_{i=1}^{m-1} (1 - S\mathbf{X}(n, i)) \cdot S\mathbf{X}(h, i) = 0 \right) \right].$$

Теорема 6.5. Пусть $\mathbf{X}^l = \mathbf{X}$ и $\mathbf{X}^{l+1} = \mathbf{Y}$, тогда ненулевые элементы матрицы переходных вероятностей ц.м. $\{\mathbf{Z}^l\}$ вычисляются по формуле

$$\Pi^{l,l+1}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \prod_{n \in N} \left(I(\mathbf{A}(n, 0) = 1) \cdot P_{\mathbf{XY}}^s(n) + I \left(\sum_{m \in M} \mathbf{A}(n, m) = 0 \right) \cdot P_{\mathbf{XY}}^-(n) + \right. \\ \left. + I \left(\sum_{m \in M \setminus \{0\}} \mathbf{A}(n, m) = 1 \right) \cdot P_{\mathbf{XY}}^+(n) \right), \text{ если } (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \in \mathcal{X} \setminus \{X_{<-1} \cup X_{>1}\}. \quad \blacksquare$$

Предположим, что существует финальное распределение $\pi(\mathbf{X}) = \lim_{l \rightarrow \infty} \pi^l(\mathbf{X})$ ц.м. $\{\mathbf{Z}^l\}$. Тогда матрица переходных вероятностей $\Pi(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ не зависит от l , следовательно, теорема 6.5 позволяет рассчитать финальные вероятности $\pi(\mathbf{X})$.

Поскольку решение задачи большой размерности, определяемой числом присутствующих в сети пользователей, связано с вычислительными сложностями, в диссертационной работе разработан приближенный рекурсивный метод для вычисления вероятности $V(n)$ непрерывного воспроизведения видео потока пользователем. Показано, что рекурсивная формула для расчета стационарных вероятностей состояния буфера дает хорошее (до 1 %) приближение для вычисления вероятностей наличия данных на каждой из позиций буфера пользователя.

Также исследована задача поиска оптимальной стратегии выбора порции данных для загрузки. Сделаны выводы о преимуществах основных стратегий загрузки данных и сформулирована задача выбора смешанной стратегии заполнения буфера, лишенной недостатков основных стратегий. Такая стратегия найдена в виде комбинации основных стратегий **LF|Gr**, при которой

вероятность непрерывного воспроизведения будет выше при меньшем времени ожидания начала просмотра (рис. 6). В этих обозначениях принято, что стратегия Latest First действует до 10-й позиции буфера включительно, а для остальных позиций действует стратегия Greedy.

Однако, как показали исследования, математические модели дают не полную картину анализа реальной сети, в которой помимо учтенных в ней параметров должны приниматься во внимание местоположение пользователей в сети и их суточная активность. *Раздел 6.4* диссертационной работы посвящен решению этой проблемы, для чего разработаны соответствующие алгоритмы и программные средства для имитационного моделирования.

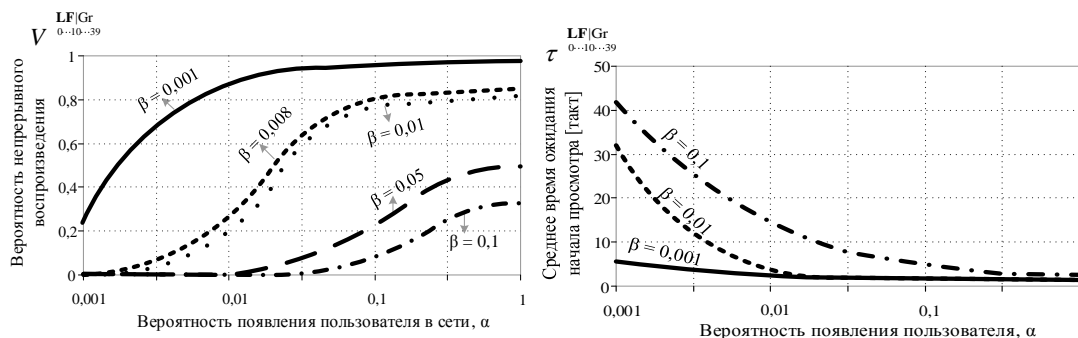


Рис. 6. Показатели качества восприятия пользователя при смешанной стратегии выбора порции данных **LF|Gr** с демаркационной точкой 10.

В основу имитационного моделирования положены полученные из официальных источников Интернет данные о местоположении пользователей

(т.н. «геолокация»), а также зависимость количества пользователей, подключенных к сети, от времени суток (т.н. «суточная активность» пользователей). Предполагается, что пользователи сети разбиваются случайным образом по часовым поясам в соответствии с заданным распределением. Также задано распределение активности пользователей в зависимости от времени суток.

На рис. 7 показаны результаты сравнения базовой модели (сплошные линии) и общей модели с учетом геолокации и суточной активности пользователей (пунктирные линии), при котором исследовалась вероятность наличия порции данных на позициях буфера.

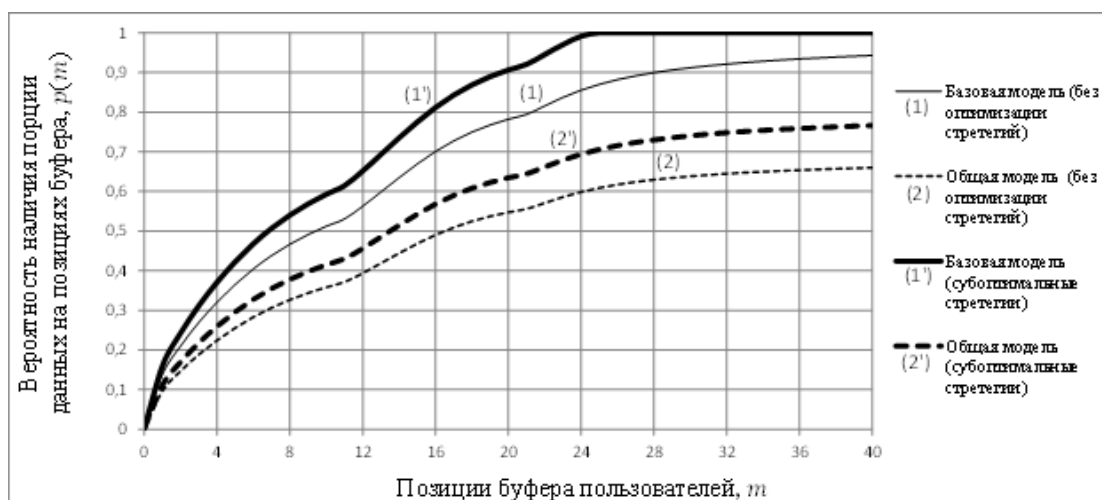


Рис. 7. Сравнение базовой модели с моделью с геолокацией и суточной активностью пользователей. Вероятность наличия порции данных в буфере

Как видно из рис. 7, результаты модели с учетом геолокации и суточной активности пользователей (тонкая пунктирная линия) качественно повторяют результаты базовой модели, в которой пользователи однородны по часовым поясам (тонкая сплошная линия). Из графиков также видно, что базовая модель дает завышенную оценку по сравнению с общей моделью, что свидетельствует о необходимости поиска других стратегий загрузки данных, позволяющих повысить значение вероятности непрерывного воспроизведения для общей модели с геолокацией и активностью пользователей. В диссертационной работе выполнены исследования таких стратегий и с помощью имитационного моделирования показано существование субоптимальной стратегии. На рис. 7 жирными линиями показана вероятность наличия порции данных в буфере для сети с применением субоптимальной стратегии, учитывающей правило разбиения пользователей на группы соседей.

Глава 6 диссертационной работы написана на основании публикаций автора [5, 14, 27, 29, 36, 40].

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Предложены три класса моделей мультисервисных и одноранговых сетей: класс марковских моделей с трафиком одноадресных и многоадресных соединений, а также трафиком межмашинных взаимодействий; класс моделей установления соединения и контроля перегрузок в сети серверов протокола установления сессий; класс моделей одноранговых сетей передачи потокового вещательного телевидения и беспроводных сетей прямого взаимодействия устройств.
2. В классе марковских моделей с трафиком одноадресных и многоадресных соединений получен метод расчета блокировки запросов пользователей с помощью рекурсивного алгоритма.
3. Для построенного комплекса моделей установления соединения в мультимедийной подсистеме мультисервисной сети в виде неоднородных СеМО и многофазных СМО с фоновым потоком заявок разработаны методы оценки квантиля и других числовых характеристик с.в. времени установления соединения при предоставлении услуги вещательного телевидения.
4. Для поллинговой модели с пороговым управлением нагрузкой при шлюзовой и исчерпывающей дисциплинах обслуживания, разработанной для оценки показателей эффективности сервера протокола установления сессий в мультимедийной подсистеме мультисервисной сети, получен матричный метод расчета характеристик модели и численно показано преимущество исчерпывающей дисциплины обслуживания.
5. Получен метод оценки числовых характеристик с.в. времени выхода системы из состояния перегрузки на базе разработанной модели гистерезисного управления нагрузкой в сети серверов протокола установления сессий в виде марковской СМО с двухпороговым управлением. Формализована и численно решена задача минимизации времени выхода сервера из состояния перегрузки за счет расположения порогов в очереди для СМО с двухпороговым управлением.
6. Разработаны модели одноранговых сетей с потоковым трафиком и методы оценки показателей эффективности – вероятности всеобщей передачи и вероятности непрерывного воспроизведения. Предложена аппроксимация нормальным законом вероятности всеобщей передачи в одноранговой сети вещательного телевидения с несколькими каналами, популярность которых распределена по закону Ципфа. Показано, что метод дает оценку сверху, точность которой повышается с ростом популярности канала.
7. Получен точный метод расчета вероятности непрерывного воспроизведения в одноранговой сети с потоковым трафиком для разработанной в виде дискретной ц.м. базовой аналитической модели, учитывающей стратегии загрузки данных в буфер оборудования пользователя и задержки передачи

данных. Метод включает теоретико-множественную модель загрузки данных для стратегий Latest First и Greedy, формулу для вероятности наличия порций данных в позициях буфера и аналитический метод расчета матрицы переходных вероятностей ц.м. Для решения задачи большой размерности получена рекурсивная приближенная формула для оценки вероятности непрерывного воспроизведения.

8. Построена общая имитационная модель одноранговой сети с потоковым трафиком, учитывающая географическое положение и суточную активность пользователей, а также стратегию разбиения пользователей на группы соседей и стратегию загрузки данных. Показано существование субоптимальной стратегии выбора группы соседей и оптимальной стратегии загрузки порции данных, совместное применение которых увеличивает вероятность непрерывного воспроизведения как в базовой, так и в общей модели.
9. Разработан аналитический метод для точного расчета характеристик с.в. отношения сигнал/интерференция для пары взаимодействующих устройств в одноранговой беспроводной сети взаимодействующих устройств. Получен приближенный метод оценки плотности распределения этой характеристики для нескольких пар устройств. Методы основаны на разработанной в терминах стохастической геометрии базовой вероятностной модели для анализа характеристик интерференции – ключевого параметра, влияющего на показатели эффективности одноранговой беспроводной сети взаимодействующих устройств.

Таким образом, в результате проведенных в диссертации исследований решена фундаментальная научная проблема по созданию теоретических основ и комплекса вероятностных моделей и методов для анализа показателей эффективности мультисервисных и одноранговых сетей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Наумов В.А. Мультипликативные решения конечных цепей Маркова: монография / В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака // М.: Изд-во РУДН, 2015. – 159 с. – 9,94 / 4,97 п.л.

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus:

2. Бузюкова И.Л. Исследование сигнальной нагрузки интеллектуальных сетей связи с узлами в разных часовых поясах / И.Л. Бузюкова, Ю.В. Гайдамака // Научно–техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд. Политехнического университета. - 2008. – Т. 65, № 5. - С. 67-74. – 0,5 / 0,25 п.л.

3. Адаму А. Анализ производительности одной схемы многоканальной передачи потоковых данных в одноранговых сетях / А. Адаму, Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2010. – № 7. – С. 14-18. – 0,31 / 0,11 п.л.
4. Адаму А. Построение и анализ модели воспроизведения каналов вещательного телевидения в Р2Р сети / А. Адаму, Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2010. – № 3(1). – С. 47-53. – 0,44 / 0,15 п.л.
5. Адаму А. К анализу состояния буфера пользователя одноранговой сети с потоковым трафиком / А. Адаму, Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2011. – № 7. – С. 8-12. – 0,11 / 0,04 п.л.
6. Самуйлов К.Е. О применении формулы Эрланга к расчету показателей качества мультисервисной сети с одноадресными и многоадресными соединениями / К.Е. Самуйлов, Ю.В. Гайдамака, О.Н. Щукина // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2011. – № 7. – С. 45-48. – 0,25 / 0,13 п.л.
7. Адаму А. Аппроксимация нормальным законом вероятностных характеристик модели сети Р2Р TV / А. Адаму, Ю.В. Гайдамака // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2011. – № 3. – С. 63-68. – 0,38 / 0,2 п.л.
8. Адаму А. Анализ вероятности непрерывного воспроизведения видеопотока в Р2Р-сети / А. Адаму, Ю.В. Гайдамака // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2011. – № 4. – С. 38-46. – 0,56 / 0,28 п.л.
9. Абаев П.О. Гистерезисное управление нагрузкой в сетях сигнализации / П.О. Абаев, Ю.В. Гайдамака, К.Е. Самуйлов // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2011. – № 4. – С. 55-73. – 1,81 / 0,61 п.л.
10. Гайдамака Ю.В. Модель одной системы массового обслуживания типа M/G/1 с гистерезисным управлением входящим потоком / Ю.В. Гайдамака, К.Е. Самуйлов, Э.С. Сопин // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2012. – № 7. – С.60-62. – 0,19 / 0,63 п.л.
11. Гайдамака Ю.В. Модель SIP-сервера с дисциплинами шлюзового и исчерпывающего обслуживания очередей / Ю.В. Гайдамака, Э.Р. Зарипова // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2013. – № 1. – С. 52-57. – 0,38 / 0,19 п.л.
12. Basharin G.P. Mathematical Theory of Teletraffic and Its Application to the Analysis of Multiservice Communication of Next Generation Networks / G.P. Basharin, Yu.V. Gaidamaka, K.E. Samouylov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. - Vol. 47. - No. 2. – Pp. 62-69. – 0,5 / 0,25 п.л. - doi: 10.3103/S0146411613020028
13. Гайдамака Ю.В. Применение системы поллинга с исчерпывающей дисциплиной обслуживания к анализу SIP-сервера / Ю.В. Гайдамака, Э.Р. Зарипова, О.Г. Вихрова // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – № 11. – С. 73-76. – 0,25 / 0,09 п.л.

14. Гайдамака Ю.В. Анализ стратегий заполнения буфера оборудования пользователя при предоставлении услуги потокового видео в одноранговой сети / Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – №11. – С. 77-81. – 0,25 / 0,13 п.л.

15. Gaidamaka Yu.V. Model with Threshold Control for Analyzing a Server with an SIP Protocol in the Overload Mode / Yu.V. Gaidamaka // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. - Vol. 47. - No. 4. – Pp. 211-218. – 0,5 / 0,5 п.л. - doi:10.3103/S0146411613040044

16. Гайдамака Ю.В. Распределение времени выхода из множества состояний перегрузки в системе $M|M|1|<L,H>|<H,R>$ с гистерезисным управлением нагрузкой / Ю.В. Гайдамака, А.В. Печинкин, Р.В. Разумчик, А.К. Самуйлов, К.Е. Самуйлов, И.А. Соколов, Э.С. Сопин, С. Я. Шоргин. // Информатика и ее применения. – 2013. – Т. 7. – Вып. 4. – С. 20-33. – 0,88 / 0,11 п.л.

17. Abaev P. Hysteretic control technique for overload problem solution in network of SIP servers / P. Abaev, Yu. Gaidamaka, K. Samouylov, A. Pechinkin, R. Razumchik, S. Shorgin // Computing and Informatics. – 2014. - Vol. 33. – Issue 1. - Pp. 218-236. – 1,19 / 0,2 п.л.

18. Гайдамака Ю.В. Оценка времени установления соединения для услуги IPTV / Ю.В. Гайдамака, Э.Р. Зарипова // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2014. – № 1. – С. 23-29. – 0,44 / 0,22 п.л.

19. Гайдамака Ю.В. Анализ некоторых характеристик СМО $M|G|1|r$ с гистерезисным управлением для исследования перегрузок SIP-сервера / Ю.В. Гайдамака, Р.И. Закирова // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2014. – № 2. – С. 43-50. – 0,5 / 0,25 п.л.

20. Gaidamaka Yu. Analysis of $M|G|1|R$ queue with batch arrivals and two hysteretic overload control policies / Yu. Gaidamaka, A. Pechinkin, R. Razumchik, K. Samouylov, E. Sopin // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2014. - Vol. 24. - No. 3. – Pp. 519-534. – 1,0 / 0,2 п.л.

21. Гайдамака Ю.В. Метод расчета характеристик интерференции двух взаимодействующих устройств в беспроводной гетерогенной сети / Ю.В. Гайдамака, А.К. Самуйлов // Информатика и ее применения – 2015. – Т. 9. – Вып. 1. – С. 9–14. – 0,38 / 0,19 п.л.

22. Башарин Г.П. Алгоритм расчета вероятностных характеристик функционирования оптических абонентских узлов в пассивной оптической сети / Г.П. Башарин, Ю.В. Гайдамака, Н.В. Русина // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2015. – № 2. – С. 28–32. – 0,31 / 0,11 п.л.

23. Гайдамака Ю.В. Анализ зависимости параметров модели сервера протокола установления сессий с групповым поступлением сообщений от распределения длины группы сообщений / Ю.В. Гайдамака, Э.Р. Зарипова, Ю.Н Орлов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2015. - № 27. – С. 1-16. - 1,0 / 0,33 п.л.

24. Samuylov A. Random Triangle: A Baseline Model for Interference Analysis in Heterogeneous Networks / A. Samuylov, Yu. Gaidamaka, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2015. - Vol. 65. - Issue 8. - Pp. 6778-6782. - 0,25 / 0,05 п.л. - doi: 10.1109/TVT.2015.2481795

25. Башарин Г.П. Анализ и алгоритм расчета вероятностных характеристик для одного абонентского узла пассивной оптической сети / Башарин Г.П., Ю.В. Гайдамака, Н.В. Русина // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2016. – № 2. – С. 5–12. – 0,5 / 0,25 п.л.

Статьи в сборниках материалов конференций, индексируемых Web of Science и Scopus:

26. Adamu A. Analytical Modeling of P2PTV Network / A. Adamu, Yu. Gaidamaka, A. Samuylov // Proc. 2d Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems IEEE ICUMT 2010, Oct. 18–20, 2010. - IEEE, 2010. - Pp. 1115-1120. - 0,38 / 0,13 п.л. -doi: 10.1109/ICUMT.2010.5676520

27. Adamu A. Discrete Markov Chain Model for Analyzing Probability Measures of P2P Streaming Network / A. Adamu, Yu. Gaidamaka, A. Samuylov // S. Balandin et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2011, LNCS 6869, pp. 428-439, 2011. - Germany, Berlin Heidelberg: Springer, 2011. - 0,75 / 0,25 п.л. - doi: 10.1007/978-3-642-22875-9_39

28. Abaev P. Modeling of Hysteretic Signalling Load Control in Next Generation Networks / P. Abaev, Yu. Gaidamaka, K. Samouylov // S. Andreev et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2012, LNCS 7469, pp. 440-452, 2012. - Germany, Berlin Heidelberg: Springer, 2012. - 0,81 / 0,27 п.л. - doi: 10.1007/978-3-642-32686-8_41

29. Gaidamaka Yu. Analytical Modeling of Playback Continuity in P2P Streaming Network with Latest First Download Strategy / Y.V. Gaidamaka, A. Samuylov // S. Balandin et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2013, LNCS 8121, pp. 363-370, 2013. - Germany, Berlin Heidelberg: Springer, 2013. - 0,5 / 0,25 п.л. - doi: 10.1007/978-3-642-40316-3_32

30. Gaidamaka Yu. Polling System with Threshold Control for Modeling of SIP Server under Overload / Yu. Gaidamaka, S. Shorgin, K. Samouylov, Sh. Etezov // J. Swiatek et al. (Eds.): Advances in Systems Science, AISC 240, pp. 97-107. - Springer Int. Publishing Switzerland 2014. - 0,69 / 0,17 п.л. - doi:10.1007/978-3-319-01857-7_10

31. Gaidamaka Yu. Modelling a Random Access Channel with collisions for M2M Traffic in LTE Networks / Yu.V. Gaidamaka, V.Y. Borodakiy, K.E. Samouylov, P.O. Abaev, I.A. Buturlin, Sh.A. Etezov // S. Balandin et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2014, LNCS 8638, pp. 301-310, 2014. - Springer Int. Publishing Switzerland 2014. - 0,63 / 0,11 п.л. - doi: 10.1007/978-3-319-10353-2_26

32. Gaidamaka Yu. Session setup delay estimation methods for IMS-based IPTV services / Yu. Gaidamaka, E. Zaripova // S. Balandin et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2014, LNCS 8638, pp. 408-418, 2014. - Springer Int.

Publishing Switzerland 2014. –0,69 / 0,35 п.л. - doi: 10.1007/978-3-319-10353-2_36

33. Gaidamaka Yu. Time-related stationary characteristics in queueing system with constant service time under hysteretic policy / Yu. Gaidamaka, A. Pechinkin, R. Razumchik // Proc. of the 6th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT 2014, St. Petersburg, Russia, Oct. 6–8, 2014. - IEEE, 2015. - Pp. 634–640. – 0,44 / 0,15 п.л. - doi: 10.1109/ICUMT.2014.7002158

34. Gaidamaka Yu. Comparison of polling disciplines when analyzing waiting time for signaling message processing at SIP-server / Yu. Gaidamaka, E. Zaripova // A. Dudin et al. (Eds.): ITMM 2015, CCIS 564, pp. 358–372. 2015. – Springer Int. Publishing Switzerland 2015. – 1,56 / 0,78 п.л. - doi: 10.1007/978-3-319-25861-4_30

35. Orlov Y. Approach to estimation of performance measures for SIP server model with batch arrivals / Y. Orlov, Yu. Gaidamaka, E. Zaripova // V. Vishnevsky and D. Kozyrev (Eds.): DCCN 2015, CCIS 601, pp. 141–150, 2016. – Springer Int. Publishing Switzerland 2016. – 0,63 / 0,21 п.л. - doi: 10.1007/978-3-319-30843-2_15

36. Gaidamaka Yu. Optimization of Selection Strategies for P2P Streaming Network Based on Daily Users' Behavior and Users' Distribution over Time Zones / Yu. Gaidamaka, I. Vasiliev // O. Galinina et al. (Eds.): NEW2AN/ruSMART 2016, LNCS 9870, pp. 525-535, 2016. - Springer Int. Publishing Switzerland 2016. – 0,81 / 0,41 п.л. - doi: 10.1007/978-3-319-46301-8_44

Публикации в других научных изданиях

37. Гайдамака Ю.В. К анализу удельной скорости загрузки пользователя сети P2PTV (тезисы, всеросс. конф.) / Ю.В. Гайдамака // Тр. Всеросс. конф. с межд. уч. «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», 18-22 апреля 2011 г. М.: РУДН, 2011. С. 71-73. – 0,19 / 0,19 п.л.

38. Gaidamaka Yu. On mathematical modeling of P2P streaming networks / Yu. Gaidamaka // Proc. Int. Conf. Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications DCCN 2013. Moscow: JSC “TECHNOSPHERA”, 2013. Pp. 188-190. – 0,19 / 0,19 п.л.

39. Гайдамака Ю.В. Разработка методики расчета показателей качества обслуживания подсистемы IMS сети 4G / Ю.В. Гайдамака // Тр. Всеросс. научной конф. «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения», Москва, 14 мая 2014 г. М.: Концерн «Системпром», 2014. Pp. 41-42. – 0,13 / 0,13 п.л.

40. Гайдамака Ю.В. Приближенный метод оценки вероятности непрерывного воспроизведения в потоковой одноранговой сети / Ю.В. Гайдамака // Тр. IX Межд. отраслевой научно-техн. конф. «Технологии информационного общества», 24 марта 2015 г. М.: МТУСИ, 2015. С. 11-12. - 0,13 / 0,13 п.л.

Гайдамака Ю.В. (Россия)

Модели и методы анализа показателей эффективности функционирования мультисервисных и одноранговых сетей

В диссертации предложены три класса математических моделей мультисервисных сетей: класс марковских моделей с трафиком одноадресных и многоадресных соединений, а также трафиком межмашинных взаимодействий; класс моделей установления соединения и контроля перегрузок в сети серверов протокола установления сессий; класс моделей одноранговых сетей, представленных сетями потокового вещательного телевидения и беспроводными сетями прямого взаимодействия устройств.

Разработаны вероятностные методы анализа показателей эффективности функционирования мультисервисных и одноранговых сетей: вероятность блокировки запроса пользователя на предоставление услуги из-за отсутствия ресурсов на звеньях сети; задержка установления соединения в мультимедийной подсистеме мультисервисной сети; вероятность обнаружения перегрузки и вероятность выхода из состояния перегрузки сервера протокола установлений соединений; распределение отношения сигнал/интерференция в беспроводной сети одноранговых устройств.

Gaidamaka Yu.V. (Russia)

Models and methods of quality performance measures for analysis of multiservice and peer-to-peer networks

Three classes of mathematical models for multiservice networks analysis are proposed: the class of Markov models with unicast and multicast traffic including machine-to-machine traffic; the class of models for analysis of Session Initiation Protocol server networks as well as a congestion control models; the class of models for analysis of peer-to-peer networks presented by streaming broadcast television networks and wireless device-to-device communication networks.

The developed probabilistic methods include the methods for analysis of performance measures and quality characteristics of multiservice and peer-to-peer networks: user request blocking probability due to lack of resources on the network link; delay in establishing a session initiation in a multiservice network through the IP-multimedia subsystem; probability of overload detecting and probability of overload detecting and overload mitigation / elimination; distribution of random signal-to-interference ratio in wireless device-to-device communication networks.