

На правах рукописи

Милованова Татьяна Александровна

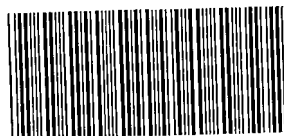
Анализ показателей эффективности функционирования
телекоммуникационных систем с вероятностным приоритетом
обслуживания и пороговым управлением нагрузкой

05.13.17 — теоретические основы информатики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2013

16 МАЙ 2013



005058607

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и математической статистики Российского университета дружбы народов

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Печинкин Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Ушаков Владимир Георгиевич**, д.ф.-м.н.,
профессор кафедры математической
статистики МГУ им. М.В. Ломоносова
Гайдамака Юлия Васильевна, к.ф.-м.н.,
доцент, доцент кафедры систем
телекоммуникаций Российского университета
дружбы народов


Ведущая организация: Институт проблем передачи информации
имени А.А. Харкевича
Российской академии наук

Защита состоится «17» мая 2013 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.203.28 при Российском университете дружбы народов по адресу: 117198, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.
(Отзывы на автореферат просьба направлять по указанному адресу)

Автореферат разослан «15» апреля 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



М.Б.Фомин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Современные телекоммуникационные сети являются результатом длительного развития ряда основополагающих технологий — информационных, компьютерных, телекоммуникационных и других. Общей целью такого развития является информатизация общества, т.е. формирование единой информационной среды, охватывающей все сферы деятельности человека. Выполнение этой задачи подразумевает развитие целой индустрии по производству, хранению, передаче и обработке информации. Для развития современных систем передачи и обработки данных требуется создание адекватных аналитических моделей, учитывающих как характерные особенности систем передачи и обработки данных, так и новые механизмы обеспечения качества их функционирования.

Математические методы теории массового обслуживания (ТМО) (значительный вклад в развитие ТМО и теории телетрафика внесли и продолжают вносить А.Я. Хинчин, Б.В. Гнеденко, А.А. Боровков, Д. Кендалл, Д. Литтл, Д. Кокс, В. Смит, Л. Клейнрок, Б.А. Севастьянов, Л. Такач, Ф. Поллачек, П.П. Бочаров, Г.П. Башарин, В.М. Вишневский, А.Н. Дудин, В.А. Ивницкий, И.Н. Коваленко, В.А. Наумов, А.В. Печинкин, А.П. Пшеничников, К.Е. Самуилов, С.Н. Степанов, И.И. Цитович и др.) позволяют создавать стохастические модели протоколов систем передачи данных, обеспечивают возможность решения задач по управлению потоками данных, расчету показателей эффективности функционирования различных компонент телекоммуникационных систем, включая оценку вероятностно-временных характеристик их узлов.

Телекоммуникационные системы третьего (3G) и четвертого (4G) поколений обеспечивают предоставление широкого класса услуг, таких как передача голосовой информации в режиме реального времени, аудио конференция, услуги мгновенных сообщений, высокоскоростного доступа в сеть Интернет и др. Для этого на каждом из уровней и участков сети (например, от базовой станции мобильного терминала и от базовой станции до контроллера радиосети) необходимы соответствующие механизмы и методы обработки и коммутации, обеспечивающие, в том числе, и качество передачи информации. Для этих целей необходимы адекватные аналитические модели, в частности, на основе систем массового обслуживания (СМО) с групповым марковским входящим потоком (ВМАР-поток) и специальными дисциплинами обслуживания. Так, например, информационные потоки в сетях доступа UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) с высо-

кой степенью достоверности моделируются с помощью группового марковского потока. Кроме того, технология обеспечения качества соединений в сетях доступа (уровень AAL2/ATM) UMTS остается предметом дискуссий и исследований и в настоящее время, а, как давно замечено, использование в системах передачи специальных дисциплин обслуживания может значительно улучшить качество их функционирования, практически без каких либо усовершенствований. Рассмотренная в диссертации специальная дисциплина обслуживания — инверсионный порядок с вероятностным приоритетом (далее — *LCFS PP*) — может рассматриваться как дополнительный механизм обеспечения эффективности функционирования систем. Вследствие развития телекоммуникационных услуг, в телекоммуникационных системах и, в том числе UMTS, возникают перегрузки. Это обстоятельство требует построения и исследования адекватных механизмов управления перегрузками, в частности, гистерезисной стратегии, которая доказала свою эффективность для управления перегрузками в традиционных телекоммуникационных системах с коммутацией каналов.

Диссертация продолжает и развивает работы в области исследования показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем третьего и четвертого поколений. В ней в более общих предположениях рассматривается дисциплина *LCFS PP*, что позволяет создавать аналитические модели, применимые для следующих целей:

- расчет показателей эффективности функционирования протоколов сетей доступа UMTS — общей задержки передачи и среднего числа переданных сообщений;

- расчет вероятности сброса поступающего сообщения, распределения времени пребывания в системе принятого сообщения при реализации на основе дисциплины *LCFS PP* механизма управления очередью;

- анализ показателей эффективности телекоммуникационных сетей с учетом особенностей поступающих пакетов, в том числе с групповым поступлением и пульсирующим трафиком¹;

исследование системы гистерезисного управления нагрузкой в сети

¹*El Bouchti A., El Kafhali S., Haqiq A. Performance Modelling and Analysis of Connection Admission Control in OFDMA based WiMAX System with MMPP Queuing // World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT), 2011. vol. 1, No. 4, Pp. 148 – 156.*

Gelenbe E., Nunez A. Self-Aware Networks and Quality of Service // O. Kaynak et al. (Eds.): ICANN/ICONIP 2003, LNCS 2714, pp. 901–908, 2003.

Lucantoni D. The BMAP[G]1 queue. A tutorial. Models and techniques for Performance Evaluation of Computer and Communication Systems. 1993. pp. 330–358.

прокси-серверов протокола инициализации сеансов связи².

Задача диссертации – разработка методов анализа эффективности телекоммуникационных систем третьего и четвертого поколений, а именно: построение аналитических моделей расчета показателей эффективности функционирования (задержка в очереди на обработку, потеря сообщений) телекоммуникационных систем с помощью СМО с групповым марковским потоком, произвольным (рекуррентным) обслуживанием, конечной и бесконечной очередью, дисциплиной обслуживания *LCFS PP* и гистерезисной политикой. Варьирование значений функций вероятностного приоритета является альтернативным (к классическому) механизмом обеспечения качества обслуживания сообщений в системе. Кроме того, учитывая текущие результаты деятельности международных стандартизирующих организаций в предметной области, можно заключить, что вопросы разработки методов и анализа качества всевозможных аспектов телекоммуникационных сетей 3G и 4G являются весьма важными. В связи с этим тематика диссертационного исследования является актуальной.

Цель диссертационной работы.

1. Разработка методов анализа показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем 3G и 4G (задержка передачи сообщения, вариация задержки) в виде СМО с конечной и бесконечной емкостью накопителя, с групповым марковским входящим потоком, произвольным (рекуррентным) обслуживанием и дисциплиной *LCFS PP* (инверсионный порядок обслуживания с вероятностным приоритетом);

2. Разработка математических методов расчета показателей эффективности (например, вероятность потерь поступающих сообщений) однопейной СМО с пуассоновским входящим потоком, рекуррентным обслуживанием, накопителем конечной емкости, дисциплиной *LCFS PP* и гистерезисной политикой;

3. Разработка численных методов расчета вероятностно-временных характеристик рассмотренных систем по полученным математическим соотношениям.

Результаты, выносимые на защиту.

1. Для телекоммуникационных систем 3G модель в виде СМО $BMAP/G/1/\tau$, $\tau \leq \infty$, с инверсионной дисциплиной обслуживания и ве-

²Pavel O. Abaev, Yuliya V. Gaidamaka, Alexander V. Pechinkin, Rostislav V. Razumchik, Sergey Ya. Shorgin Simulation of overload control in SIP server networks // Proceedings of the 26th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2012. - Germany, Koblenz. - 2012. - P. 533-539.

роятностным приоритетом и интегро-дифференциальные уравнения для стационарных плотностей вероятностей марковского процесса, описывающего функционирование данной системы.

2. Метод анализа и расчета вероятностно-временных характеристик СМО $ВМАР/G/1/r$, $r \leq \infty$, — стационарные вероятности числа заявок в системе, среднее число заявок в системе, стационарные вероятности потери и недообслуживания заявки (случай $r < \infty$), преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) времени ожидания и времени пребывания заявок в системе.

3. Для телекоммуникационных систем 4G построение и анализ модели с гистерезисной политикой в виде СМО $M/G/1/r$, $r \leq \infty$, с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом.

4. Для СМО $M/G/1/r$, $r \leq \infty$, с инверсионной вероятностной дисциплиной обслуживания и гистерезисным управлением нагрузкой — интегро-дифференциальные уравнения для стационарных плотностей вероятностей того, что в системе находится n заявок, а остаточная длина заявки на приборе x , и численный анализ ее вероятностно-временных характеристик.

Научная новизна. Все результаты диссертации являются новыми. По сравнению с известными результатами, в диссертации получены следующие результаты:

1. Предложен подход к построению аналитических моделей анализа эффективности функционирования телекоммуникационных систем 3G и 4G, который заключается в комбинировании сложной дисциплины обслуживания ($LCFS PP$), входящего $ВМАР$ -потока, произвольного обслуживания и механизма управления перегрузками.

2. Рассмотрены общие варианты СМО с дисциплиной $LCFS PP$, в которых обслуживание рекуррентно, а входящие потоки являются обобщениями потока фазового типа и не являются рекуррентными. Ранее результаты были получены для СМО $МАР/G/1/r$ с дисциплиной $LCFS PP$.

3. Для анализа показателей эффективности систем доступа UMTS впервые предложена модель с групповым марковским входящим потоком, произвольным (рекуррентным) обслуживанием и дисциплиной $LCFS PP$, а также получен метод нахождения ее стационарных характеристик (задержки и разброса задержки передачи, среднего числа переданных сообщений, вероятности потери).

4. Разработан метод для вычисления показателей эффективности функционирования SIP-серверов с двухпороговым гистерезисным управлением, произвольным обслуживанием и дисциплиной $LCFS PP$. Ранее

результаты были получены для дисциплины *FCFS*.

Методы исследования. В работе используются методы теории вероятностей, теории случайных процессов, теории массового обслуживания, численные методы.

Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность работы следует из использования строгих математических методов исследования и подтверждается вычислительным экспериментом.

Обоснованность предположений о входящем потоке следует из различных исследований³, в которых подтверждается, что информационные потоки в телекоммуникационных сетях 3G с высокой степенью достоверности моделируются с помощью группового марковского потока.

Теоретическая и практическая ценность. Математические и вычислительные методы, разработанные в диссертации, могут применяться для расчета и анализа характеристик качества телекоммуникационных сетей третьего поколения, в частности при моделировании работы протоколов сети доступа UMTS, компьютерных систем, в которых входящий поток заданий не является рекуррентным, а их объем известен лишь с некоторой вероятностью. Полученные в диссертации методы и результаты могут также найти применение в дальнейшем исследовании более сложных СМО с марковским входящим потоком, рекуррентным обслуживанием и другими особенностями функционирования. Созданные на основе полученных теоретических результатов программы позволяют производить расчет качественных характеристик для таких систем при их эксплуатации и проектировании.

Исследования проводились в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 02-07-90147 «Математические методы и программное обеспечение моделирования информационных, вычислительных и телекоммуникационных систем», № 06-07-89056 «Математические модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение, основан-

³См., например, Xi Li, Su Li, Carmelita Gurg and Andreas Timm-Giel, "Traffic Modeling and Characterization for UTRAN 4th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications, 2006.

SH. Kang, YH Kim, DK Sung and BD Choi An application of Markovian Arrival Process to modeling superposed ATM cell streams. IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 4, pp. 633-642, 2002.

A. Klemm, C. Lindemann and M. Lohmann Modeling IP traffic using the batch markovian arrival process. Performance Evaluation, 54, pp. 149-173. 2003.

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; End-to-end multimedia services performance metrics (3GPP TR 26.944 version 8.0.0 Release 8).

ное на веб-технологиях, для проведения фундаментальных исследований в области анализа производительности сетевых систем», № 11-07-00112 «Информационная технология и программные средства моделирования и анализа функциональных и структурных характеристик потоков в информационных и телекоммуникационных системах с большим числом пользователей» и №12-07-00108 «Информационная технология и программные средства моделирования и анализа механизмов управления перегрузками прокси-серверов в сети связи следующего поколения (NGN)».

Реализация результатов работы. Результаты диссертации использовались в научно-исследовательских работах (НИР), проводимых Институтом проблем информатики Российской академии наук:

— Разработка общих базовых математических методов расчёта систем массового обслуживания, функционирующих в дискретном времени;

— Исследование систем и сетей массового обслуживания специального вида и информационно-управляющих систем с новыми видами обратной связи;

— Исследование систем и сетей массового обслуживания специального вида с ненадёжными приборами и отрицательными заявками.

Кроме того результаты диссертации были внедрены в учебный процесс (дисциплина "Дополнительные главы ТМО", читаемая студентам третьего курса направления "Прикладная математика и информатика" РУДН) и вошли в программу "WEB-ориентированный программный комплекс удаленного расчета стационарных характеристик систем массового обслуживания"⁴.

Апробация работы. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались на

— мемориальном семинаре, посвященном 60-летию со дня рождения Владимира Калашникова «Прикладные вероятностные модели и информационные процессы (Петрозаводск, 2002 год);

— на Всероссийских конференциях по проблемам математики, информатики, физики, химии и методики преподавания естественнонаучных дисциплин (Москва, 2003, 2004, 2009 годы);

— на Всероссийской конференции «Прикладная теория вероятностей и теоретическая информатика» (Москва, 2012 год);

— на научных семинарах РУДН и Института проблем информатики РАН.

⁴Дата регистрации Роспатентом 11.01.2010г., номер свидетельства о регистрации № 2010610026.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ (из них 5 тезисы докладов на всероссийских и международных конференциях, 7 статьи в научных журналах), список которых приводится в конце автореферата. Основные результаты представлены в работах, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК, и получены лично соискателем. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в проведении исследований и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, разделённых на пункты, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 135 страницах, включая 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и определены научная новизна и практическая ценность работы.

В Главе 1 с целью анализа показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем 3G построена модель узла в виде СМО $MAP/G/1/\infty$ с накопителем бесконечной емкости и дисциплиной обслуживания $LCFS PP$. Для решения задачи нахождения и расчета показателей эффективности функционирования (таких, как средняя задержка передачи, вариация задержки и др.) были исследованы ее стационарные характеристики и получен аналитический метод расчета стационарного времени ожидания сообщения с началом обслуживания.

Групповой марковский поток задан матрицами Λ и N_k , $k \geq 1$, порядка l . Все элементы матрицы Λ (за исключением элементов на главной диагонали) и матриц N_k являются неотрицательными числами. Элемент $(\Lambda)_{ij}$ матрицы Λ при $i \neq j$ является интенсивностью перехода процесса генерации с фазы i на фазу j , не сопровождаемого поступлением новой группы заявок, а элемент $(N_k)_{ij}$ матрицы N_k , $k \geq 1$, — интенсивностью перехода с фазы генерации i на фазу j , при котором поступает новая группа заявок размера k . Положим $\tilde{N}_k = \sum_{i=0}^{\infty} N_{k+i}$ и обозначим через $\Lambda^* = \Lambda + \tilde{N}_1$ инфинитезимальную матрицу процесса генерации заявок. Предполагается, что матрица Λ^* неразложима, а матрица \tilde{N}_1 отлична от нулевой. Тогда вектор стационарных вероятностей фаз генерации заявок $\vec{\pi}$ находится из системы уравнений равновесия $\vec{0} = \vec{\pi}\Lambda^*$ с условием нормировки $\vec{\pi}\vec{1} = 1$.

Времена обслуживания заявок (длины заявок) независимы в совокупности и имеют функцию распределения $B(x)$ (и плотность $b(x) = B'(x)$) с конечным средним $b = \int_0^{\infty} x dB(x) < \infty$.

Предполагается, что в момент прихода заявок в систему становятся известными их длины. Инверсионный порядок обслуживания с вероятностным приоритетом — *LCFS PP* — определяется следующим образом:

1) Если в момент поступления группы из k заявок система свободна, то первая заявка из этой группы сразу же начинает обслуживаться, остальные заявки занимают первые $k - 1$ мест в очереди.

2) Если в системе имеется n заявок, и поступает группа, содержащая k заявок, то первая заявка длины x из группы, заставшая на приборе заявку длины y , с вероятностью $d(x, y)$, зависящей только от длин x и y и не зависящей от предыстории функционирования системы, прерывает обслуживание и сама становится на прибор, остальные $k - 1$ заявки из этой группы занимают первые $k - 1$ мест в очереди, а ранее обслуживаемая заявка занимает k -е место в очереди. Заявки, находящиеся в очереди до поступления группы, становятся после этой заявки с сохранением порядка.

3) Если в системе имеется n заявок, и поступает группа, содержащая k заявок, причем первая имеет длину x , и застает на приборе заявку длины y , то с вероятностью $1 - d(x, y)$, зависящей только от длин x и y и не зависящей от предыстории функционирования системы, заявка на приборе продолжает обслуживаться, поступившая группа из k заявок занимает первые k мест в очереди, остальные заявки, находящиеся в очереди, становятся после группы вновь пришедших заявок с сохранением порядка.

Заявки, обслуживание которых было прервано, дообслуживаются в течение времени, равного их недообслуженной длине в момент прерывания обслуживания.

Функционирование данной системы можно описать случайным процессом $\{\eta(t) = (\zeta(t), \nu(t), \xi^T(t)), t \geq 0\}$. Здесь $\zeta(t)$ — фаза генерации в момент t , $\nu(t)$ — число заявок в системе в момент t , а $\xi^T(t) = (\xi_1(t), \dots, \xi_{\nu(t)}(t))$, где $\xi_1(t), \dots, \xi_{\nu(t)}(t)$ — (остаточные) длины заявок, находящихся в системе и расположенных в порядке очереди в момент t , т.е. $\xi_1(t)$ — длина обслуживаемой заявки, $\xi_2(t)$ — длина заявки, находящейся в очереди на первом месте, и т.д. При $\nu(t) = 0$ вектор $\xi^T(t)$ не определяется. Процесс $\{\eta(t), t \geq 0\}$ является эргодическим. Предполагается, что выполнено условие $\rho = \lambda b < 1$, где $\lambda = \bar{\pi}^T \sum_{k=1}^{\infty} k N_k \bar{1}$ — стационарная интенсивность поступления заявок. Это условие является необходимым и достаточным условием существования стационарного режима.

Обозначим через \vec{p}_0 вектор стационарных вероятностей того, что в системе отсутствуют заявки, а через $\vec{p}_n(x)$, $n = \overline{1, \infty}$, вектор плотностей веро-

ятностей того, что в системе находится n заявок и заявка на приборе имеет длину x . В диссертации получен аналитический метод нахождения вероятностей \bar{p}_0 и $\bar{p}_n(x)$, и доказаны следующие два утверждения, составляющие суть данной главы.

Утверждение 1. Стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания произвольной заявки в терминах ПЛС $\bar{w}(s)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{w}(s) = & \frac{1}{\lambda} \left[\bar{p}_0 \sum_{k=1}^{\infty} N_k \left[I + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j) \right] + \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{p}_n(y) \sum_{k=1}^{\infty} N_k \left(d(x, y) \left[I + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j, x) \right] + \right. \\ & \left. \left. + [1 - d(x, y)] H(s|y) \left[I + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j, x) \right] \right) b(x) dx dy \right]. \end{aligned}$$

Здесь элемент $(W(s|m, x))_{ij}$ матрицы $W(s|m, x)$ является ПЛС времени ожидания начала обслуживания заявки, занимающей последнее место в очереди, в которой находится m заявок, а заявка на приборе имеет длину x , а матрица $W(s|m)$ имеет аналогичный смысл, но при условии, что заявка на приборе имеет произвольную длину. Элемент $(H(s|x))_{ij}$ матрицы $H(s|x)$ есть ПЛС периода занятости (ПЗ) и события, заключающегося в том, что в конце ПЗ фаза генерации будет j при условии, что ПЗ открывался заявкой длины x . Уравнения для определения этих матриц в автореферате не приводятся в силу их громоздкости.

Утверждение 2. Стационарное распределение времени пребывания в системе произвольной заявки из вновь поступивших в терминах ПЛС $\bar{v}(s)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{v}(s) = & \frac{1}{\lambda} \left[\bar{p}_0 \sum_{k=1}^{\infty} N_k \left(I + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j) \right) U(s) + \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{p}_n(y) \sum_{k=1}^{\infty} N_k \left(d(x, y) \left[U(s|x) + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j, x) U(s) \right] + \right. \\ & \left. \left. + [1 - d(x, y)] H(s|y) \left[U(s|x) + \sum_{j=1}^{k-1} W(s|j, x) U(s) \right] \right) b(x) dx dy \right]. \end{aligned}$$

Здесь элемент $(U(s|x))_{ij}$ матрицы $U(s|x)$ является ПЛС времени от начала обслуживания заявки длины x до момента ухода ее из системы и события, заключающегося в том, что в момент ухода заявки фаза генерации будет j , при условии, что в начале обслуживания она была i , а матрица $(U(s|x))_{ij}$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} U(s|x) = \left(- (sI - \Lambda) + \sum_{k=1}^{\infty} N_k \int_0^{\infty} b(y) [d(y, x)W(s|k, y) + [1 - d(y, x)]] dy \right) U(s|x)$$

с начальным условием $U(s|0) = I$.

В главе 2 продолжается исследование СМО с групповым марковским входящим потоком, рекуррентным обслуживанием, с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом, но рассмотрен накопитель конечной емкости. Необходимость рассмотрения подобной модели вызвана тем, что современные телекоммуникационные системы обладают хотя и большой, но все же конечной емкостью, из-за чего могут происходить потери сообщений. В связи с этим существует необходимость в разработке метода расчета нового показателя эффективности — вероятности потери сообщения. В силу возникновения ограничения на емкость накопителя существенно меняется и метод исследования СМО, который и составляет суть данной главы.

Для анализа СМО $VMAP/G/1/\tau$ был применен метод введения вспомогательных переменных, в качестве которых выбраны остаточные времена обслуживания заявок.

Обозначим через \vec{p}_0 вектор стационарных вероятностей того, что в системе отсутствуют заявки, через $\vec{P}_n(x)$ — вектор стационарных вероятностей того, что в системе находится n заявок и остаточная длина заявки на приборе меньше x , а через $\vec{p}'_n(x) = \vec{P}'_n(x)$ — вектор производных.

Обозначим также через α_1 стационарную вероятность потери произвольной заявки при поступлении новой группы заявок, а через α_2 стационарную вероятность того, что принятая в систему заявка не будет обслужена до конца.

Для нахождения вектора вероятностей состояний $\vec{p}_n(x)$ в диссертации был применен метод, основанный на исключении из рассмотрения тех интервалов времени, когда случайный процесс находится в некотором под-

множестве состояний, и последующем склеивании оставшихся кусков процесса, и доказано следующее утверждение.

Утверждение 3. Вероятности α_1 и α_2 находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{\lambda} \left[\bar{p}_0 \sum_{k=R+1}^{\infty} N_k(k-R) + \right. \\ &+ \sum_{n=1}^R \int_0^{\infty} \bar{p}_n(y) \sum_{k=R-n+1}^{\infty} N_k \left((k-R+n) \int_0^{\infty} d(x,y)b(x) dx + \right. \\ &\quad \left. \left. + (k-R+n-1) \int_0^{\infty} [1-d(x,y)]b(x) dx \right) dy \right] \bar{1}, \\ \alpha_2 &= \frac{1}{\lambda(1-\alpha_1)} \left[\bar{p}_0 \left(\sum_{k=1}^r N_k \left(\bar{\alpha}_{k-1}^{(2)} + \sum_{j=1}^{k-1} F_{R-k+j-1, j-1} \bar{\alpha}_{k-j-1}^{(2)} \right) + \right. \right. \\ &+ \bar{N}_R \left(\bar{\alpha}_r^{(2)} + \sum_{j=1}^r F_{j-1, j-1} \bar{\alpha}_{r-j}^{(2)} \right) \left. \right) + \sum_{n=1}^r \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{p}_n(y) \left(\sum_{k=1}^{R-n} N_k \left[d(x,y) \left(\bar{\alpha}_{k+n-1}^{(2)}(x) + \right. \right. \right. \right. \\ &+ \sum_{j=1}^{k-1} F_{R-n-k+j-1, j-1}(x) \bar{\alpha}_{n+k-j-1}^{(2)} \left. \left. \left. \right) + [1-d(x,y)] F_{R-k-n}(y) \left(\bar{\alpha}_{k+n-2}^{(2)}(x) + \right. \right. \right. \\ &+ \left. \left. \left. \sum_{j=1}^{k-1} F_{R-n-k+j, j-1}(x) \bar{\alpha}_{n+k-j-2}^{(2)} \right) \right] + \bar{N}_{R-n+1} d(x,y) \left(\bar{\alpha}_r^{(2)} + \sum_{j=1}^{r-n} F_{j-1, j-1} \bar{\alpha}_{r-j}^{(2)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + N_{R-n+1} [1-d(x,y)] \left(\bar{\alpha}_r^{(2)}(x) + \sum_{j=1}^{r-n+1} F_{j-1, j-1}(x) \bar{\alpha}_{r-j}^{(2)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \bar{N}_{R-n+2} [1-d(x,y)] \left(\bar{\alpha}_r^{(2)} + \sum_{j=1}^{R-n} F_{j-1, j-1} \bar{\alpha}_{r-j}^{(2)} \right) \right) b(x) dx dy + \\ &+ \left. \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{p}_R(y) \left(N_1 [1-d(x,y)] \bar{\alpha}_r^{(2)}(x) + \bar{N}_2 [1-d(x,y)] \bar{\alpha}_r^{(2)} \right) b(x) dx dy \right]. \end{aligned}$$

Здесь и далее $R = r + 1$. Координатой $(\bar{\alpha}_n^{(2)}(x))_i$ вектора $\bar{\alpha}_n^{(2)}(x)$, $n = \bar{0}, \bar{r}$, является вероятность того, что заявка длины x , принятая в систему, не

будет обслужена до конца, при условии, что в начале ее обслуживания фаза генерации заявки была i и в системе была очередь длины n . Элемент $(F_n(x))_{ij}$ матрицы $F_n(x)$ представляет собой условную вероятность того, что в конце ПЗ n -системы (вспомогательная система $VMAP/G/1/n$ с n , $0 \leq n \leq r$, местами ожидания и дисциплиной обслуживания $LCFS PP$, отличающаяся от исходной СМО только числом мест ожидания), открываемого заявкой длины x , фаза генерации будет j , при условии, что в начале этого ПЗ фаза генерации была i , а элемент $(F_{n,k}(x))_{ij}$ матрицы $F_{n,k}(x)$ представляет собой условную вероятность того, что в конце ПЗ n -системы, открываемого заявкой длины x на приборе и еще k заявками в очереди, $k \leq n$, фаза генерации будет j , при условии, что в начале этого ПЗ фаза генерации была i , а $F_n = \int_0^\infty F_n(x)b(x) dx$, $F_{n,k} = \int_0^\infty F_{n,k}(x)b(x) dx$. Уравнения для определения этих величин в автореферате не приводятся в виду их громоздкости.

Для рассматриваемой системы в диссертации также получены выражения для ПЛС времени ожидания начала обслуживания и времени пребывания заявки в системе.

Был разработан программный комплекс на языке Delphi, реализующий разработанные аналитические методы. В диссертации проведены расчеты и представлены численные примеры расчета таких характеристик СМО, как стационарные вероятности числа заявок в системе, стационарные вероятности потери и недообслуживания заявки, средняя длина очереди и др.

Возникающие в современных телекоммуникационных системах 3G и 4G потери сообщений значительным образом снижают эффективность их функционирования. Для сглаживания негативного эффекта от перегрузок требуется разработка, анализ и внедрение соответствующих механизмов управления перегрузками.

Глава 3 посвящена анализу телекоммуникационных систем 4G, в которых для повышения эффективности функционирования используются дисциплина с вероятностным приоритетом обслуживания и гистерезисное управление поступающей нагрузкой. Рассматривается СМО $M|G|1|r$, $r \leq \infty$, с гистерезисной политикой и дисциплиной $LCFS PP$ (см. рис. 1). Гистерезисная политика заключается в следующем. Имеется два порога n_0 и n_1 , причём $n_1 < n_0$. Сначала, пока число заявок в системе меньше n_0 , система функционирует в режиме 0. Это означает, что заявки поступают с интенсивностью λ_0 и имеют длину, распределённую по закону $B_0(x)$ с плотностью $b_0(x) = B'_0(x)$ и средним значением $b_0 = \int_0^\infty x b_0(x) dx < \infty$.

Как только число заявок в системе впервые становится равным n_0 , система переходит в режим 1. В этом режиме заявки поступают с интенсивностью λ_1 и имеют длину, распределённую по закону $B_1(x)$ с плотностью $b_1(x) = B_1'(x)$ и средним значением $b_1 = \int_0^\infty x b_1(x) dx < \infty$. Так продолжается до тех пор, пока число заявок в системе не станет равным n_1 . Тогда система переходит в режим 0 и т.д.

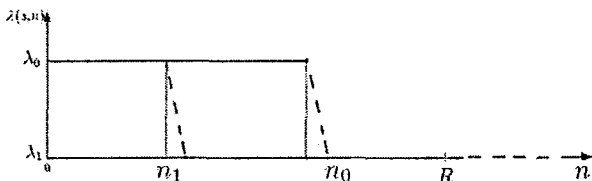


Рис. 1: Схема двухпороговой гистерезисной политики.

В системе также реализован инверсионный порядок обслуживания с вероятностным приоритетом. Особенность этой дисциплины для рассматриваемой системы в следующем: если система функционирует в режиме 0, то с вероятностью $d_0(x, y)$ на прибор становится вновь поступившая заявка, а находящаяся ранее на приборе занимает первое место в очереди, и наоборот, с вероятностью $\bar{d}_0(x, y) = 1 - d_0(x, y)$ старая заявка продолжает обслуживаться, а новая становится на первое место в очереди. Если же система функционирует в режиме 1, то вероятность постановки на прибор вновь поступившей заявки равна $d_1(x, y)$, а на первое место в очереди — $\bar{d}_1(x, y) = 1 - d_1(x, y)$.

Для данной СМО разработан метод, позволяющий находить стационарные плотности вероятностей $p_n(x)$ того, что в системе находится n , $n = \bar{1}, n_1$ и $n_0 \leq n \leq r$, заявок, причём заявка на приборе имеет длину x , стационарные плотности вероятностей $p_n(0; x)$ того, что система функционирует в режиме 0 и в системе находится n , $n = n_1 + 1, n_0 - 1$, заявок, причём заявка на приборе имеет длину x , а также аналогичные плотности вероятностей $p_n(1; x)$, когда система функционирует в режиме 1.

Получены формулы для ПЛС стационарного распределения времени ожидания начала обслуживания и стационарного распределения общего времени пребывания заявки в системе. По полученным выражениям были проведены численные расчеты. Примеры расчета среднего и дисперсии времени пребывания заявки в системе при $\bar{d}_0(x, y) = d_1(x, y) = 0$ для систем $M|M|1|49$ и $M|D|1|49$ с гистерезисной политикой ($n_0 = 30, n_1 = 20$) и дисциплиной $LCFS PP$ представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

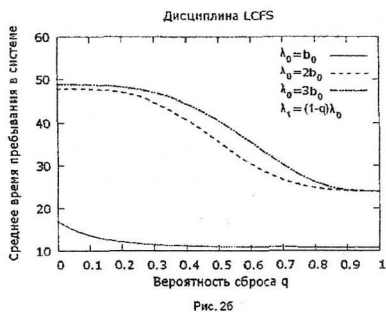
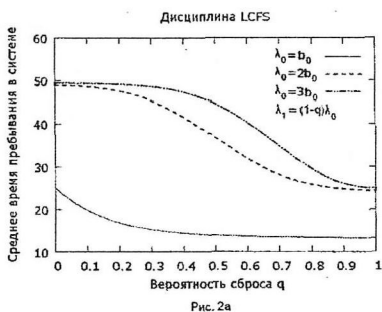


Рис. 2: Среднее время пребывания заявки в системе: (а) экспоненциальное обслуживание с $b_0 = b_1 = 1$; (б) детерминированное обслуживание с $b_0 = b_1 = 1$.

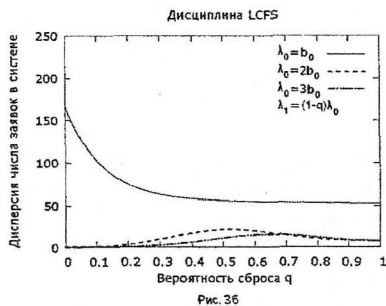
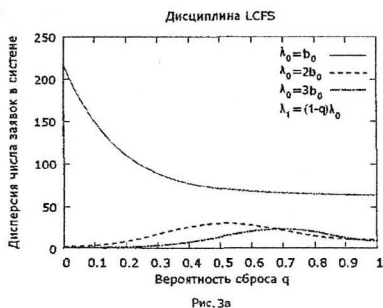


Рис. 3: Дисперсия времени пребывания заявки в системе: (а) экспоненциальное обслуживание с $b_0 = b_1 = 1$; (б) детерминированное обслуживание с $b_0 = b_1 = 1$.

В заключительном разделе сформулированы результаты работы и перечислены характеристики моделей СМО, для которых получены расчетные формулы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен аналитический метод нахождения показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем, моделируемых с помощью СМО с групповым марковским входящим потоком, произвольным (рекуррентным) обслуживанием, инверсионной дисциплиной обслуживания с вероятностным приоритетом (*LCFS PP*).

2. Для телекоммуникационных систем 3G и 4G на основе СМО $M/G/1/r$ с инверсионной дисциплиной обслуживания и вероятностным приоритетом, накопителем конечной и бесконечной емкости, разработаны математические методы анализа и расчета вероятностно-временных характеристик: стационарных распределений числа заявок, вероятности блокировки и недообслуживания заявки, распределения времени пребывания заявки в системе.

3. Для телекоммуникационных систем, моделируемых с помощью СМО $M/G/1/r$ с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом и гистерезисной политикой, накопителем конечной и бесконечной емкости, получены уравнения для расчета вероятностно-временных характеристик: стационарных распределений числа заявок, распределения времени пребывания заявки в системе.

4. Разработан метод расчета и проведен численный анализ стационарных характеристик рассмотренных моделей по полученным математическим соотношениям, а также метод анализа и расчета вероятностно-временных характеристик телекоммуникационных систем, моделируемых с помощью СМО $M/G/1/r$ и СМО $M/G/1/r$ с накопителем конечной и бесконечной емкости.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих опубликованных работах:

1. *Pechinkin A., Svistcheva T.* Queue $M/G/1$ with inverse discipline and probabilistic priority // Book of Abstracts of Applied stochastic Models and Information Processes. Memorial Seminar Dedicated to the 60th Birthday of Vladimir Kalashnikov, 2002. P. 25.

2. *Печинкин А.В., Свищева Т.А.* Система $M/G/1/r$ с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Прикладная математика и информатика, 2002. № 1. С. 80–89.

3. *Pechinkin A., Svistcheva T.* Queue $M/G/1$ with Inverse Discipline and Probabilistic Priority // Информационные процессы, 2002. № 2. С. 243.

4. *Печинкин А.В., Свищева Т.А.* Стационарные характеристики в системе $M/G/1/\infty$ с инверсионным обслуживанием и вероятностным приоритетом // Тезисы докладов XXXIX Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики, химии и методики преподавания естественнонаучных дисциплин, РУДН, 2003. - С. 37.

5. *Печинкин А.В., Свищева Т.А.* Система $M/G/1/\infty$ с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом // Вестник

Российского университета дружбы народов. Сер. Прикладная математика и информатика, 2003. № 1. С. 109–118.

6. Сеищева Т.А. Численные результаты расчета стационарных вероятностей системы $M\bar{A}P/G/1/\infty$ (LCFS PP) // Тезисы докладов XL Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики, химии и методики преподавания естественнонаучных дисциплин. - М.: РУДН, 2004. - С. 41–43.

7. Милованова Т.А. Система $B\bar{M}A\bar{P}/G/1/r$ с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом // Информационные процессы, 2007. № 2. С. 153–167.

8. Милованова Т.А. Стационарные характеристики, связанные с временем пребывания заявки в системе $B\bar{M}A\bar{P}/G/1/r/LCFS\ PP$ // Информационные процессы, 2007. № 4. С. 411–424.

9. Милованова Т.А. Система $B\bar{M}A\bar{P}/G/1/\infty$ с инверсионным обслуживанием и выбором для обслуживания заявки минимальной длины // Тезисы докладов XLV Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии, РУДН, 2009. - С. 111–112.

10. Милованова Т.А. Система $B\bar{M}A\bar{P}/G/1/\infty$ с инверсионным порядком обслуживания и вероятностным приоритетом // Автоматика и телемеханика, 2009. № 5. С. 885–896.

11. Печинкин А.В., Милованова Т.А. Стационарные характеристики системы обслуживания с инверсионным порядком обслуживания, вероятностным приоритетом и гистерезисной политикой // Тезисы докладов Всероссийской конференции “Прикладная теория вероятностей и теоретическая информатика”, 2012. С. 67–69

12. Милованова Т.А., Печинкин А.В. Стационарные характеристики системы обслуживания с инверсионным порядком обслуживания, вероятностным приоритетом и гистерезисной политикой // Информатика и ее применения. 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 23–36.

Милованова Татьяна Александровна

Анализ показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем с вероятностным приоритетом обслуживания и пороговым управлением нагрузкой

В диссертации разработаны математические модели расчета показателей эффективности функционирования телекоммуникационных систем на основе СМО с вероятностным приоритетом обслуживания и пороговым управлением нагрузкой. Для СМО с групповым марковским входящим потоком, рекуррентным обслуживанием и дисциплиной обслуживания *LCFS PP* получены выражения для вероятности потери, недообслуживания заявок и распределения времени ожидания начала обслуживания и времени пребывания заявок в системе в виде ПЛС. Для СМО с пуассоновским входящим потоком, рекуррентным обслуживанием, дисциплиной обслуживания *LCFS PP* и гистерезисной политикой получены аналитические выражения для стационарного распределения длины очереди и стационарных характеристик, связанных с временем пребывания заявок в системе. Разработаны численные алгоритмы расчета стационарных характеристик рассмотренных моделей по полученным математическим выражениям.

Milovanova Tatiana Alexandrovna

Analysis of performance characteristics of telecommunication systems with probabilistic priority and threshold load control

In this thesis consideration is given to the development of analytical methods for the computation of performance characteristics of telecommunication systems using queueing systems with probabilistic priority and threshold load control. Expressions for stationary loss probabilities and stationary waiting and sojourn time distributions are derived in terms of Laplace-Stieltjes transform for queue with batch markovian arrival process, general service time distribution and *LCFS PP* service discipline. Stationary joint probability distribution and stationary waiting and sojourn time distribution are obtained for queue with Poisson input flow, general service time distribution, *LCFS PP* service discipline and single-level hysteric control policy. Based on obtained results there were developed efficient numerical algorithms for calculation of main stationary characteristics.

Подписано в печать: 12.04.2013

Заказ № 8332 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru