

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ ИМЕНИ А.И. ГУСЕЙНОВА**

На правах рукописи

ФАТТАХОВА МЕХРИБАН ИСА КЫЗЫ

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ
МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ**

3338.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

БАКУ- 2013

Работа выполнена в Институте Кибернетики им. А.И.Гусейнова Национальной Академии Наук Азербайджана.

Научный консультант:

Член-корреспондент НАН Азербайджана,
доктор технических наук, профессор

А.З. Меликов

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Доктор технических наук, профессор
Доктор технических наук, профессор

А.Н.Дудин
Н.Ф. Мусаева
А.А. Алиев

Ведущая организация: Институт информационных технологий НАН Азербайджана.

Защита состоится 24 мая 2013 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 01.121 при Институте Кибернетики Национальной Академии Наук Азербайджана по адресу: AZ1141, г. Баку, ул. Б.Вахаб-заде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Кибернетики НАН Азербайджана.

Автореферат разослан 22 апреля 2013 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доц.**

А.Б.Пашаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для решения проблем проектирования новых и эксплуатации действующих мультисервисных систем телетрафика (МСТ) широко используются методы моделирования. Эти методы составляют основы математической теории телетрафика, которая сформировалась в последние годы как самостоятельная научная дисциплина. Весомые вклады в этой теории внесли Г.П.Башарин, В.М.Вишневский, А.Н.Дудин, В.А.Ершов, А.И.Ляхов, И.Н.Коваленко, Ю.В.Малинковский, М.А.Матальцкий, А.З.Меликов, А.А.Назаров, В.И.Нейман, Л.А.Пономаренко, В.В.Рыков, О.М.Тихоненко, К.Е.Самуйлов, С.Н.Степанов, А.Д.Харкевич, J.R.Artalejo, H.Akimaru, R.J.Boucherie, J.N.Daigle, M.Kawashima, V.D.Casares-Giner, S.Chakravarthy, B.D.Choi, G.Giambene, R.Guerin, Y.Fang, V.B.Iversen, J.S.Kaufman, L.Kleinrock, F.Kelly, M.F.Neuts, C.S.Kim, S.S.Rapoport, K.W.Ross, K.Trivedi, L.Wei и их ученики.

Среди современных МСТ особую актуальность представляют сотовые сети связи (ССС). Анализ процессов обработки разнородной информации в ССС показывает, что использование классических моделей многопоточковых систем обслуживания для их изучения, как правило, не позволяет получить достаточно точные результаты. Это объясняется тем, что классические модели не учитывают ряд специфические особенности ССС, в частности игнорируется эффект хэндовер (handover or handoff), различные требования к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS), предъявляемыми различными типами вызовов, возможность использования множественных приоритетов для удовлетворения заданного уровня QoS вызовов реального и нереального времени и т.д. Поэтому требуется разработать более точные модели МСТ, которые учитывают специфические моменты их работы.

С другой стороны учет этих моментов работы реальных МСТ приводят к непомерному возрастанию числа возможных различных их состояний, т.е. модели изучаемых МСТ становятся практически необозримыми. Одной из актуальных задач математической теории телетрафика, и является преодоление этой основной трудности – большой размерности фазового пространства состояний модели системы.

Таким образом, актуальность проблемы заключается в необходимости повышения адекватности математических моделей процессов обработки вызовов в МСТ, разработки методов расчета и оптимизации этих систем, обеспечивающих повышение их эффективности.

Цель работы состоит в разработке адекватных математических моделей современных МСТ и методов их анализа и оптимизации, которые позволяют с повышенной степенью точности описывать реальные процессы обработки разнородной информации.

С учетом этой цели в работе решаются следующие **задачи**:

- анализ, обобщение и развитие теоретических положений математической теории телетрафика;
- разработка методов анализа МСТ с различными стратегиями доступа, как при наличии очередей, так и при их отсутствии;
- разработка эффективных численных методов оптимизации МСТ, как при наличии очередей, так и при их отсутствии;
- разработка эффективных численных методов расчета моделей МСТ большой размерности;
- разработка нового класса моделей МСТ с множественными приоритетами;
- разработка эффективных численных методов расчета и оптимизации моделей МСТ с множественными приоритетами.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использованы методы математической теории телетрафика, системного анализа, теории массового обслуживания, математического программирования, теория Марковских процессов принятия решений, элементы теории графов и математическое моделирование.

Научная новизна. Основные результаты работы, представленные к защите и имеющую научную новизну, заключаются в следующем:

1. Разработаны точный и приближенный методы расчета показателей QoS односкоростной и многоскоростной модели Эрланга с рандомизированной стратегией доступа и показана возможность применения полученных результатов для моделей проводных и беспроводных МСТ. Доказано, что ряд известные результаты, в том числе результаты для моделей ССС со стратегией резервирования каналов, являются частными случаями полученных здесь результатов.

2. Предложена новая стратегия доступа в ССС, которая ограничивает доступ разнотипных вызовов в зависимости от числа вызовов того же типа в каналах. Разработаны точный и приближенный методы расчета показателей QoS предложенной стратегии и доказано, что ряд известных результатов являются частными случаями полученных здесь результатов.

3. Проведен сравнительный анализ показателей QoS сотовых сетей связи при использовании различных стратегий доступа. Показана, что степень трудности в реализации изучаемых стратегий доступа почти одинаковые. Вместе с тем, для удовлетворения заданных требований на показатели QoS конкретной системы необходимо решить оптимизационные задачи по выбору надлежащих значений параметров каждой стратегии доступа.

4. Разработаны модели и методы решения задач оптимизации показателей QoS сотовых сетей связи при использовании различных стратегий доступа. Предложены два подхода. Первый подход состоит в решении задач параметрической оптимизации, и второй подход предлагает использовать методы теории Марковских процессов принятия решений (МППР). При первом подходе класс допустимых стратегий доступа считается заданным, и задача состоит в определении параметров этих стратегий. А второй подход состоит в определении класса стратегий доступа.

5. Разработаны численные методы исследования моделей моносервисных ССС при наличии очереди (конечной и бесконечной) вызовов обоих типов (новые и хэндовер вызовы). Для моделей с бесконечными очередями установлены условия их эргодичности. Показано, что многие ранее известные результаты являются частными случаями результатов, полученных в данной работе. Для моделей всех типов разработаны простые вычислительные процедуры расчета их показателей QoS.

6. Разработаны численные методы исследования моделей мультисервисных ССС при наличии лишь очереди (конечной и бесконечной) вызовов нереального времени. Для моделей с бесконечными очередями установлены условия их эргодичности. Рассмотрены односкоростные и многоскоростные модели с терпеливыми и нетерпеливыми вызовами. Для моделей всех типов разработаны простые вычислительные процедуры расчета их показателей QoS.

7. Предложен новый класс множественных приоритетов в МТС с ограниченными общими очередями. В них вызовы нереального времени имеют высокие абсолютные приоритеты на входе в буфер и низкие приоритеты при выборе для обслуживания, а вызовы реального времени, наоборот, имеют высокие относительные приоритеты при выборе для обслуживания и низкие приоритеты на входе в буфер. Предложен и обоснован новый эффективный численный метод расчета моделей любой размерности с такими приоритетами. Решены задачи их оптимизации.

Практическая ценность работы заключается в том, что использование разработанных в ней методов, моделей, алгоритмов и программных средств позволяют повысить эффективность функционирования МТС на стадии их эксплуатации за счет реализации оптимальных стратегий обработки разнотипных вызовов. Использование результатов работы для проектирования МТС позволит осуществить решение указанной проблемы в более короткие сроки и при меньших затратах.

В диссертационную работу включены результаты, полученные автором в Институте Кибернетики НАН Азербайджана с 2000 года. Многие из них включены в список важнейших результатов НАН Азербайджана в 2002-2006, 2009-2011 годы.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в учебном процессе в Национальном Техническом Университете “Киевский Политехнический Институт”, Украина. Они также в виде методических указаний сданы в промышленную эксплуатацию в информационно-вычислительном центре Министерства Связи и Информационных Технологий Азербайджанской Республики. По результатам работы получен один патент Азербайджанской Республики.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: II Республиканской научной конференции “Современные проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий” (Баку, 2004); XVIII, XX and XXI Belarusian Winter Workshop on Queuing Theory “Queues, Systems, Networks” (Minsk, 2005, 2009, 2011); International Conferences “Problems of Cybernetics and Informatics” (Baku, 2006, 2010); X, XI, XII International Conferences “System Analysis and Information

Technologies” (Kiev, 2008, 2009, 2010); 6th St. Petersburg Workshop on Simulation, 2009; 9th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (Riga, 2009); Международной научной конференции Моделирование-2010 (Киев, 2010); I Международном Конгрессе по Информатике “Информационные системы и технологии” (Минск, 2011); World Congress on Engineering and Technology (Shanghai, 2011).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 44 научных работ, в том числе 40 из них зарубежом. Основные научные результаты освещены в работах, приведенных в списке публикаций автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 258 страниц, в том числе 53 рисунков, 19 таблиц и 177 наименований в списке литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цели и основные задачи, приведены основные положения, представленные на защиту, и показана структура диссертации.

В первой главе исследуются основные теоретические и прикладные проблемы применения математической теории телетрафика для анализа и оптимизации МСТ. Отмечается, что стремление к максимальной точности описания функционирования МСТ приводит к тому, что соответствующие математические модели становятся все более и более сложными. При этом усложняется их математический анализ, аппарат анализа становится громоздким и часто недоступным в инженерной практике. В связи с этим в математической теории телетрафика разработаны ряд методов, ориентированные к решению определенных круг задач.

В настоящей главе работы даются необходимые сведения из математической теории телетрафика, которые связаны с тематикой данной диссертации. В начале рассматриваются проблемы разработки методов и моделей анализа и оптимизации процессов обработки разнородной информации (данных, речи, видеoinформации, телефаксов и др.) в мультисервисных ССС. Отмечается, что функционирование таких сетей на уровне сообщений могут быть

достаточно точно описаны лишь с помощью моделей систем обслуживания с разнотипными трафиками. Анализ процессов обслуживания вызовов в классических системах с разнотипными трафиками показывает, что они базируются на ряд основополагающих предпосылках. Так, в частности, в них понятия “время обслуживания вызова” и “длительность занятия канала” совпадают. Однако в мультисервисных ССС из-за явления хэндовер указанное требование не выполняется. Кроме того в моделях ССС необходимо учитывать нетерпеливость хэндовер вызовов из-за конечности длины интервала деградации. Поэтому с целью повышения адекватности их математических моделей целесообразно исследовать модели, в которых не выполняются указанные требования. Дан обзор работ, в которых эти требования частично учитываются. Отмечается, что известные методы их исследования оказываются приемлемыми лишь для моделей малой размерности и совсем не пригодны даже для моделей умеренной размерности.

Специальный параграф посвящен изучению моделей мультисервисных сетей на уровне пакетов. С этой целью рассмотрены проблемы локального управления ресурсами в узлах сетей коммутации пакетов мультимедийного трафика. С целью получения достаточно обзримых результатов различаются трафики двух типов: реального времени (или срочного) и не реального времени (или несрочного).

Введен новый класс приоритетов – множественные приоритеты. Показывается необходимость их использования в сетях коммутации пакетов. Указывается, что пространственные приоритеты вводятся с целью разрешения конфликтных ситуаций на входе коммутатора, в то время как временные приоритеты предназначены для регулирования очереди на выходе коммутатора.

Основная трудность при моделировании и анализе сложных мультисервисных сетей проявляется в непомерном возрастании числа возможных различных их состояний, что приводит к практической необозримости модели. Отмечается, что одной из актуальных задач математической теории телеграфика, и является преодоление этой основной трудности – большой размерности фазового пространства состояний (ФПС) модели системы.

Во второй главе рассмотрены методы и модели анализа моделей без очередей при различных стратегиях доступа (Call Admission Control, SAC). Сначала аналитический подход разработан

для многоскоростной модели Эрланга с рандомизированной САС. Краткое описание модели состоит в следующем. Рассматривается модель многоканальной системы, содержащей $N > 1$ каналов, на вход которой поступают K типов пуассоновских потоков вызовов, при этом интенсивность i -го потока равна λ_i ; каждый вновь поступивший вызов i -го типа требует одновременно b_i каналов; время занятия каналов i -вызовом является случайной величиной, подчиненной показательному закону распределения с параметром μ_i , $i = 1, \dots, K$.

Определяется матрица доступа размерности $K \times N$, элементы которой задают правила приема разнотипных вызовов в зависимости от их типа и количества занятых каналов. Элемент матрицы $\alpha_i(n)$ указывает вероятность принятия i -вызова на обслуживание, если в момент его поступления число занятых каналов равно n ; с дополнительной вероятностью $1 - \alpha_i(n)$ данный вызов теряется. При этом $\alpha_i(n) = 0$ для любого $i = 1, \dots, K$, если $n > N - b_i$.

Основными показателями QoS являются стационарная вероятность блокировки i -вызовов, P_i , $i = 1, \dots, K$ и среднее число занятых каналов, N_{av} . Доказано, что справедливо следующее

Утверждение 1. Если $\mu_i = \mu_j$, $i, j = 1, \dots, K$, то искомые показатели QoS модели вычисляются так:

$$P_i = \left(\sum_{n=0}^N (1 - \alpha_i(n)) g_n \right) / \left(\sum_{n=0}^N g_n \right), i = 1, \dots, K; \quad (1)$$

$$N_{av} = \left(\sum_{n=1}^N n g_n \right) / \left(\sum_{n=0}^N g_n \right). \quad (2)$$

Здесь и в дальнейшем используются следующие обозначения: $v_i := \lambda_i / \mu_i$, $i = 1, \dots, K$;

$$g_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i \tilde{v}_i (n-i) g_{n-i}, & n = 1, \dots, N; \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{v}_i(n-i) := \sum_{j \in A(i)} v_j \alpha_j(n-i)$, где $A(i) := \{j: j\text{-вызовы требуют } i \text{ каналов}\}$.

Далее рассмотрены применения разработанного метода для расчета моделей МСТ связи со стратегией доступа, основанной на схеме резервирования каналов. Рассматривается задача расчета мультисервисной ССС. В ней различаются четыре типа вызовов: хэндовер речевые вызовы (hv-вызовы), новые речевые вызовы (ов-

вызовы), хэндовер вызовы данных (hd-вызовы) и новые вызовы данных (od-вызовы). В сети используется фиксированная схема распределения каналов и каждая сота имеет $N > 1$ радиоканалов. Интенсивность x -вызовов равна λ_x , $x \in \{hv, ov, hd, od\}$. Для обслуживания одного речевого вызова требуется лишь один свободный канал, а один неэластичный вызов данных требует одновременно $b > 1$ каналов. Функции распределения времени занятия каналов разнотипными вызовами являются экспоненциальными, при этом средняя интенсивность обработки одного речевого вызова (нового или хэндовер) равна μ_v , а соответствующий показатель для вызовов данных (новых или хэндовер) равен μ_d . В системе используется следующая многопороговая САС. Определяются три параметра N_1 , N_2 и N_3 , где N_1 и N_2 являются кратными b . Эти параметры удовлетворяют неравенству: $0 < N_1 \leq N_2 \leq N_3 \leq N$. Предложенная стратегия определяется так:

- Если в момент поступления od-вызова число занятых каналов системы не больше $N_1 - b$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.
- Если в момент поступления hd-вызова число занятых каналов системы не больше $N_2 - b$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.
- Если в момент поступления ov-вызова число занятых каналов системы меньше N_3 , то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.
- Если в момент поступления hv-вызова имеется хотя бы один свободный канал системы, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.

Показано, что данная модель является частным случаем исследуемой выше модели с рандомизированной САС. После определенных преобразований получается, что в данной модели при $\mu_v = \mu_d$ параметры g_n , $n = 0, 1, \dots, N$, определяются из следующих простых формул:

$$g_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ \frac{1}{n} ((v_v I(n-1 < N_3) + v_{hv} I(n-1 \geq N_3)) g_{n-1} + b(v_d I(n \leq N_1) + v_{hd} I(N_1 < n \leq N_2)) g_{n-b}), & n = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (4)$$

где $g_x := 0$, если $x < 0$; $v_{ov} = \lambda_{ov} / \mu_v$, $v_{hv} = \lambda_{hv} / \mu_v$, $v_v = v_{ov} + v_{hv}$; $v_{od} = \lambda_{od} / \mu_d$, $v_{hd} = \lambda_{hd} / \mu_d$, $v_d = v_{od} + v_{hd}$.

Следовательно, искомые показатели QoS вычисляются так:

$$P_{hv} = \pi(N); P_{ov} = \sum_{n=N_3}^N \pi(n); P_{od} = \sum_{n=N_1-b+1}^N \pi(n); P_{hd} = \sum_{n=N_2-b+1}^N \pi(n). \quad (5)$$

В случаях $\mu_v \neq \mu_d$ можно использовать различные схемы приближенного решения задачи.

Далее предложена новая многопараметрическая САС в описанной выше беспроводной интегральной сети передачи речи и данных, которая основана на схеме введения ограничений на количества разнотипных вызовов в каналах соты. Если в момент поступления hv-вызовов имеется хотя бы один свободный канал, то он принимается для обслуживания; в противном случае он получает отказ. С целью определения стратегии доступа для вызовов остальных типов вводятся три параметра R_1 , R_2 и R_3 , где $0 < R_1 \leq R_2 \leq R_3 \leq N$. Если в момент поступления od-вызова (hd-вызова и ов-вызова, соответственно) число вызовов данного типа меньше R_1 (R_2 и R_3 , соответственно), то он принимается для обслуживания; в противном случае он получает отказ. Доказано, что справедливо следующие утверждения.

Утверждение 2. Вероятности потери разнотипных вызовов определяются так:

$$P_{hv} := \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_d + n_v, N); \quad (6)$$

$$P_{ov} := \sum_{n \in S} p(n) I(n_v \geq R_3); \quad (7)$$

$$P_{od} := \sum_{n \in S} p(n) I(n_d \geq R_1) + \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_d + n_v, N) I(n_d < R_1); \quad (8)$$

$$P_{hd} := \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_d, R_2) + \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_d + n_v, N) I(n_d < R_2). \quad (9)$$

где $p(n)$ – стационарная вероятность состояния $n \in S$, $\delta(i, j)$ – символы Кронекера.

Среднее число занятых каналов соты (N_{av}) определяется следующим образом:

$$N_{av} := \sum_{k=1}^N k \xi(k), \quad (10)$$

где $\xi(k) := \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_d + n_v, k)$.

Утверждение 3. Стационарное распределение данной цепи Маркова определяется так:

Для случая $R_2 + R_3 \leq N$:

$$p(n_d, n_v) = \begin{cases} \frac{v_d^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } n_d \leq R_1, n_v \leq R_3, \\ \frac{v_d^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{R_3} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } n_d \leq R_1, R_3 < n_v \leq N, \\ \frac{v_{hd}^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot \left(\frac{v_d}{v_{hd}} \right)^{R_1} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } R_1 < n_d \leq R_2, n_v \leq R_3, \\ \frac{v_{hd}^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot \left(\frac{v_d}{v_{hd}} \right)^{R_1} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{R_3} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } R_1 < n_d \leq R_2, R_3 < n_v \leq N. \end{cases} \quad (11)$$

Для случая $R_2 + R_3 > N$:

$$p(n_d, n_v) = \begin{cases} \frac{v_d^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } 0 \leq n_d \leq R_1, 0 \leq n_v \leq R_3, \\ \frac{v_{hd}^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot \left(\frac{v_d}{v_{hd}} \right)^{R_2} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } R_1 + 1 \leq n_d \leq R_2, 0 \leq n_v \leq N - n_d, \\ \frac{v_{hd}^{n_d}}{n_d!} \cdot \frac{v_v^{n_v}}{n_v!} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{R_3} \cdot p(0,0), & \text{ãñëè } 0 \leq n_d \leq N - R_3 - 1, R_3 + 1 \leq n_v \leq N. \end{cases} \quad (12)$$

В обоих случаях $p(0,0)$ находится из условия нормировки.

В данной главе разработаны также приближенные методы исследования моделей мультисервисных ССС при использовании обеих стратегий доступа. Из-за ограниченности объема автореферата здесь приводится окончательный вид алгоритма приближенного вычисления показателя QoS лишь модели с САС, основанной на схеме резервирования каналов:

$$P_{hv} \approx \sum_{k=0}^{N_2} \pi(< k >) \rho_k(N - k); \quad (13)$$

$$P_{ov} \approx \sum_{k=0}^{N_2} \pi(< k >) \sum_{i=N_3-k}^{N-k} \rho_k(i); \quad (14)$$

$$P_{hd} \approx \sum_{k=0}^{N_2} \pi(< k >) \sum_{i=N_2-k}^{N-k} \rho_k(i); \quad (15)$$

$$P_{od} \approx \sum_{k=0}^{N_1-1} \pi(< k >) \sum_{i=N_1-k}^{N-k} \rho_k(i) + \sum_{k=N_1}^{N_2} \pi(< k >); \quad (16)$$

$$\tilde{N} \approx \sum_{k=1}^N k \sum_{i=0}^{f(k)} \pi(\langle i \rangle) \rho_i(k-i). \quad (17)$$

Входящие в формулы (13)-(17) величины вычисляются так:

$$\rho_k(i) = \begin{cases} \frac{v_v^i}{i!} \rho_k(0) & \text{если } 1 \leq i \leq N_3 - k, \\ \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{N_3-k} \frac{v_{hv}^i}{i!} \rho_k(0) & \text{если } N_3 - k + 1 \leq i \leq N - k, \end{cases}$$

$$\rho_k(0) = \left(\sum_{i=0}^{N_3-k} \frac{v_v^i}{i!} + \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{N_3-k} \sum_{i=N_3-k+1}^{N-k} \frac{v_{hv}^i}{i!} \right)^{-1};$$

$$q(\langle k \rangle, \langle k' \rangle) = \begin{cases} \lambda_d \sum_{i=0}^{N_1-k-1} \rho_k(i) + \lambda_{hd} \sum_{i=N_1-1}^{N_2-k-1} \rho_k(i) & \text{если } 0 \leq k \leq N_1 - 1, k' = k + 1, \\ \lambda_{hd} \sum_{i=0}^{N_2-k-1} \rho_k(i) & \text{если } N_1 \leq k \leq N_2 - 1, k' = k + 1, \\ k\mu_d & \text{если } k' = k - 1, \\ 0 & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$\pi(\langle k \rangle) = \frac{\pi(\langle 0 \rangle)}{k! \mu_d^k} \prod_{i=1}^k q(\langle k-1 \rangle, \langle k \rangle), \quad k = \overline{1, N_2},$$

$$\pi(\langle 0 \rangle) = \left(1 + \sum_{k=1}^{N_2} \frac{1}{k! \mu_d^k} \prod_{i=1}^k q(\langle k-1 \rangle, \langle k \rangle) \right)^{-1}.$$

Подобные алгоритмы разработаны для однокоростной и многокоростной модели со стратегией доступа, основанной на схеме отсекания вызовов. В этой главе приводятся результаты численных экспериментов для каждой модели при различных стратегиях доступа. С их помощью показана достаточно высокая точность предложенных приближенных методов для обеих стратегий доступа. Из-за ограниченности объема автореферата здесь приводятся лишь часть результатов для модели с САС, основанной на схеме отсекания вызовов (см. Табл.1-3. где ТЗ – точное значение, ПЗ – приближенное значение). Исходные данные модели выбирались так: $N=16$, $R_3=14$, $R_2=12$, $\lambda_{ov}=10$, $\lambda_{hv}=6$, $\lambda_{od}=4$, $\lambda_{hd}=3$, $\mu_v=10$, $\mu_d=2$.

Выполнен сравнительный анализ показателя QoS модели при различных стратегиях доступа. Некоторые сравнения показаны на рис.1-5, где 1 – кривая показателя QoS при использовании стратегии,

основанной на резервировании каналов, а 2 – аналогичная кривая при использовании стратегии отсечения вызовов. В графиках по оси абсцисс указан параметр стратегии, основанной на схеме отсечения вызовов (R_1) и, он соответствует параметру N_1 стратегии, основанной на схеме резервирования каналов. Из графиков на рис.1-4 видно, что для выбранных исходные данные три показателя QoS модели, кроме вероятности потери хэндовер речевых вызовов (рис.2), существенно лучше при применении предложенной стратегии доступа. Значения среднего числа занятых каналов в обеих стратегиях являются почти одинаковыми (рис.5). Однако, вполне возможно, что при других значениях исходных данных модели показатели QoS (все или некоторые) стратегии, основанной на схеме резервирования каналов, будут лучше, чем в стратегии, основанной на схеме отсечения вызовов. Иными словами, следует ожидать, что при одинаковых значениях числа каналов соты, нагрузках и желаемых диапазонах изменения значений показателей QoS одна из стратегий будет удовлетворять заданные требования, а другая – нет. Поскольку обе стратегии имеют одинаковую степень сложности в реализации, то в каждом конкретном случае необходимо провести серьезные исследования по выбору надлежащей стратегии доступа.

Таблица 1. Сравнительный анализ результатов для речевых вызовов.

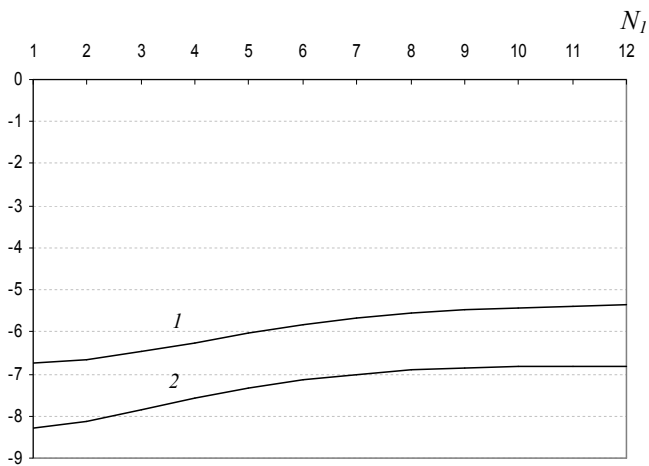
R_1	P_{ov}		P_{hv}	
	ТЗ	ПЗ	ТЗ	ПЗ
1	1.63037E-09	5.06936E-09	4.08595E-10	3.83878E-09
2	1.89571E-09	7.46011E-09	1.28180E-09	6.55444E-09
3	7.04518E-09	1.36060E-08	6.64946E-09	1.28031E-08
4	3.58332E-08	2.56116E-08	3.55293E-08	2.48398E-08
5	1.66965E-07	4.49222E-08	1.66703E-07	4.41587E-08
6	6.58181E-07	7.03534E-08	6.57938E-07	6.95918E-08
7	2.15079E-06	9.75989E-08	2.15056E-06	9.68376E-08
8	5.79051E-06	1.21224E-07	5.79028E-06	1.20463E-07
9	1.28550E-05	1.37699E-07	1.28548E-05	1.36938E-07
10	2.36734E-05	1.46838E-07	2.36731E-05	1.46077E-07
11	3.65635E-05	1.50780E-07	3.65633E-05	1.50019E-07
12	4.64357E-05	1.51979E-07	4.64357E-05	1.51218E-07

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов для вызовов данных

R_l	P_{od}		P_{hd}	
	ТЗ	ПЗ	ТЗ	ПЗ
1	8.38737E-01	8.37572E-01	3.77778E-08	3.84384E-09
2	4.35358E-01	4.62070E-01	4.50956E-08	6.56316E-09
3	2.45045E-01	1.98542E-01	7.25459E-08	1.28211E-08
4	1.17207E-01	6.78561E-02	1.53606E-08	2.48803E-08
5	1.68981E-02	1.87948E-02	4.04312E-08	4.42521E-08
6	8.97290E-03	4.32383E-03	1.17164E-08	6.98093E-08
7	4.27351E-03	8.46798E-04	3.30711E-08	9.73448E-08
8	1.82383E-04	1.44218E-04	8.44834E-07	1.21647E-07
9	7.00046E-05	2.17927E-06	1.90211E-06	1.39699E-07
10	2.43698E-05	3.04947E-06	3.80323E-06	1.52529E-07
11	7.83341E-06	4.96980E-07	7.00469E-06	1.65051E-07
12	8.05375E-07	1.86294E-07	9.15432E-06	1.86294E-07

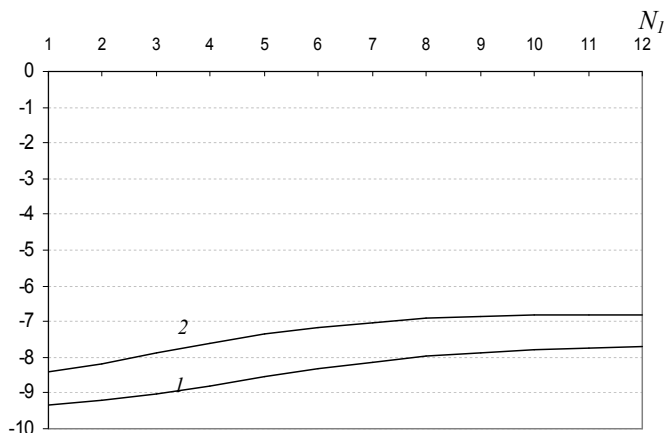
Таблица 3. Сравнительный анализ результатов для среднего числа занятых каналов

R_l	N_{av}	
	ТЗ	ПЗ
1	2.783511	2.772190
2	3.146135	3.055078
3	3.310075	3.249941
4	3.351735	3.346218
5	3.395505	3.382321
6	3.400233	3.392265
7	3.409345	3.395523
8	3.411452	3.396039
9	3.411499	3.396129
10	3.411500	3.396142
11	3.411523	3.396144
12	3.411525	3.396145



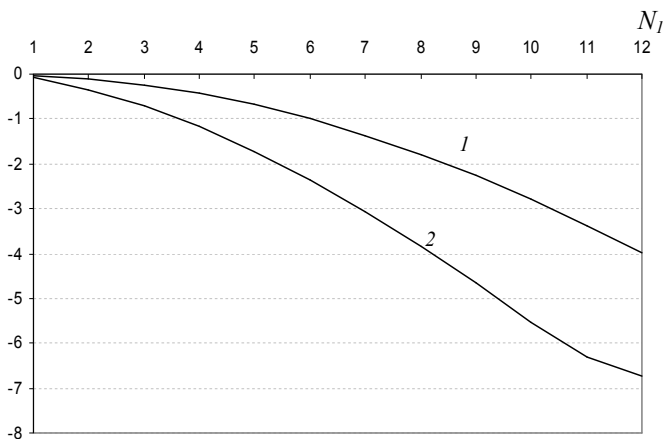
LgP_{ov}

Рис.1. Сравнительный анализ для P_{ov} при различных стратегиях доступа.

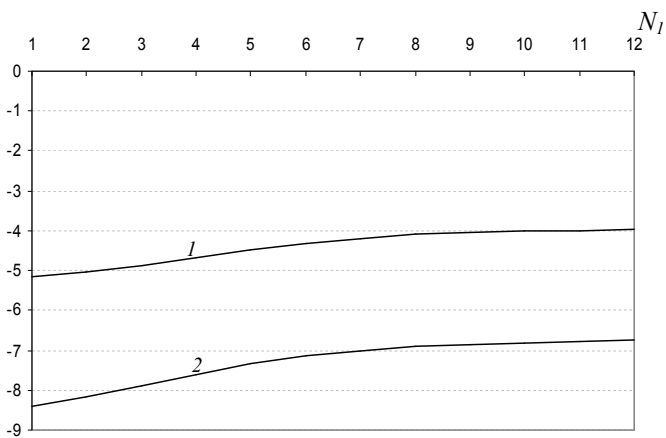


LgP_{hv}

Рис.2. Сравнительный анализ для P_{hv} при различных стратегиях доступа.



LgP_{od}
 Рис.3. Сравнительный анализ для P_{od} при различных стратегиях доступа.



LgP_{hd}
 Рис.4. Сравнительный анализ для P_{hd} при различных стратегиях доступа.

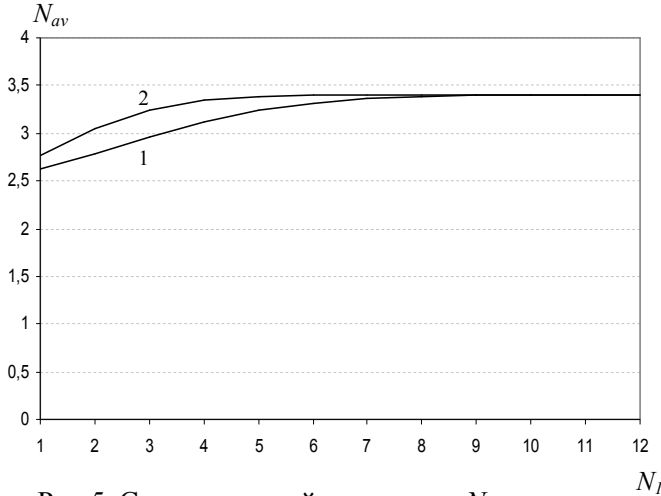


Рис.5. Сравнительный анализ для N_{av} при различных стратегиях доступа.

В третьей главе разработаны методы решения задач выбора надлежащих значений параметров различных САС с целью удовлетворения заданного уровня показателей QoS мультисервисных сетей. Эти задачи называются задачами параметрической оптимизации. Одна из таких задач для стратегии доступа, основанной на резервирование каналов имеет следующий вид. Требуется найти множество таких значений пороговых параметров, при которых удовлетворяется заданный уровень качества обслуживания разнотипных вызовов. Это множество (если оно не пусто) называется множеством эффективных значений (МЭЗ) пороговых параметров.

Пусть при фиксированных нагрузках заданы верхние пределы для возможных значений вероятностей потерь разнотипных вызовов. Тогда задача математически записывается так: требуется найти такие пары (N_2, N_3) , где $N_2 \leq N_3$, при котором удовлетворяются следующие ограничения:

$$P_{hv} \leq \varepsilon_{hv}, \quad (18)$$

$$P_{ov} \leq \varepsilon_{ov}, \quad (19)$$

$$P_d \leq \varepsilon_d. \quad (20)$$

где ε_{hv} , ε_{ov} и ε_d являются заданными величинами.

В работе предложен итеративный алгоритм решения задачи (18)-(20), который использует классические методы оптимизации. С помощью разработанных алгоритмов выполнены численные эксперименты. Исходные данные тестовых задач (18)-(20) для гипотетической модели выбраны следующим образом: $N=50$, $\lambda_{ov}=8$, $\lambda_{hv}=3$, $\lambda_{od}=2$, $\lambda_{hd}=1$, $\mu_v=9$, $\mu_d=4$. МЭЗ для этой задачи при различных ограничениях на вероятности потери разнотипных вызовов показаны в табл.4.

Таблица 4. Результаты решения задачи (18)-(20)

ε_{hv}	ε_{ov}	ε_d	МЭЗ
10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	[12,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	[10,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}	[9,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-5}	10^{-3}	[8,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}	[8,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	[8,30]×[31,50]
10^{-4}	10^{-2}	10^{-3}	[8,30]×[31,50]
10^{-2}	10^{-4}	10^{-3}	[8,30]×[31,50]

Далее рассмотрена аналогичная задача оптимизации для стратегии доступа, основанной на отсекация вызовов.

Здесь также решена задача нахождения оптимальной стратегии доступа. Она сформулирована как задача Марковского процесса принятия решений (МППР) и состоит в следующем: требуется найти такую стратегию доступа, при которой было бы возможным минимизировать взвешенной суммы вероятностей потери разнотипных вызовов. Иными словами, целью исследования является решение задачи достижения

$$\frac{1}{v} \sum_{x \in \{od, hd, ov, hv\}} v_x P_x \rightarrow \min, \quad (21)$$

где $v := \sum_{x \in \{od, hd, ov, hv\}} v_x$.

Стратегия доступа, являющаяся решением задачи (21), называется оптимальной. С целью определения стратегию доступа разнотипных вызовов вводятся Марковские управляющие параметры (МУП), оценивающие вероятности принятия альтернативных решений. Пусть в момент поступления x -вызова, $x \in \{od, ov, hd, hv\}$ система находится в состоянии $n \in S$, в котором $n_d + n_v < N$, где n_d и n_v

указывают суммарное число вызовов данных и речевых вызовов, соответственно, и S означает ФПС системы. Тогда возможно принятие одного из двух решений: либо (а) x -вызов принимается на обслуживание, либо (б) он получает отказ. Вероятности принятия указанных решений обозначаются соответственно через $\alpha_x^+(\mathbf{n})$ и $\alpha_x^-(\mathbf{n})$. Они удовлетворяют следующим условиям:

$$0 \leq \alpha_x^\pm(\mathbf{n}) \leq 1; \quad (22)$$

$$\alpha_x^+(\mathbf{n}) + \alpha_x^-(\mathbf{n}) = 1. \quad (23)$$

Показано, что при определённых значениях введённых МУП получаются известные стратегии доступа, в том числе рассмотренные выше САС. Доказано, что справедливо следующее

Утверждение 4. Вероятность потери x -вызовов, $x \in \{\text{od}, \text{ov}, \text{hd}, \text{hv}\}$, определяется так:

$$P_x = \sum_{\mathbf{n} \in S_d} p(\mathbf{n}) + \sum_{\mathbf{n} \in S - S_d} p(\mathbf{n}) \alpha_x^-(\mathbf{n}), \quad (24)$$

$$S := \{\mathbf{n} : n_d = 0, 1, \dots, N, n_v = 0, 1, \dots, N; n_d + n_v \leq N\}, S_d := \{\mathbf{n} \in S : n_d + n_v = N\}.$$

Ограничения задачи (21) задаются с помощью уравнений равновесия для стационарных вероятностей состояний модели.

Утверждение 5. СУР имеет следующий вид:

Для $\mathbf{n} \in S - S_d$:

$$\left(\sum_{x \in \{\text{od}, \text{hd}, \text{ov}, \text{hv}\}} \lambda_x \alpha_x^+(\mathbf{n}) + n_d \mu_d + n_v \mu_v \right) p(\mathbf{n}) = \sum_{x \in \{\text{od}, \text{hd}\}} \lambda_x p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) \alpha_x^-(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) I(n_d > 0) +$$

$$+ \sum_{x \in \{\text{ov}, \text{hv}\}} \lambda_x p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) \alpha_x^-(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) I(n_v > 0) + (n_d + 1) p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_1) I(n_d + n_v < N) +$$

$$+ (n_v + 1) p(\mathbf{n} + \mathbf{e}_2) I(n_d + n_v < N); \quad (25)$$

Для $\mathbf{n} \in S_d$:

$$(n_d \mu_d + n_v \mu_v) p(\mathbf{n}) = \sum_{x \in \{\text{od}, \text{hd}\}} \lambda_x p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) \alpha_x^-(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) I(n_d > 0) +$$

$$+ \sum_{x \in \{\text{ov}, \text{hv}\}} \lambda_x p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) \alpha_x^-(\mathbf{n} - \mathbf{e}_x) I(n_v > 0). \quad (26)$$

Задача (21) при ограничениях (22), (23), (25)-(26) является задачей МППР. Она имеет оптимальное решение, согласно которому значения $\alpha_x^\pm(\mathbf{n})$ равны либо 0, либо 1 для каждого $x \in \{\text{od}, \text{ov}, \text{hd}, \text{hv}\}$. Следует отметить, что конкретный вид оптимальной стратегии доступа существенным образом зависит от значения нагрузочных и структурных параметров сети.

В четвертой главе диссертации предложены численные методы расчета показателей QoS моносервисных и мультисервисных ССС с ограниченными и неограниченными очередями при различных стратегиях доступа разнотипных вызовов. Исследуются модели, в которых доступ разнотипных вызовов регулируются с помощью САС, основанные на схеме отсечения вызовов реального времени и резервирования каналов. Стратегия доступа с отсечением вызовов определяется следующим образом. Если в момент поступления од-вызова имеется хотя бы один свободный канал системы, то такой вызов принимается на обслуживание; в противном случае он теряется. Если же в момент поступления hd-вызова все каналы соты являются занятыми, то этот вызов присоединяется к очереди. Доступ речевых вызовов осуществляются согласно следующей схеме:

- Если в момент поступления ов-вызова общее число речевых вызовов меньше R_{ov} , $0 < R_{ov} < N$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.

- Если в момент поступления hv-вызова общее число речевых вызовов меньше R_{hv} , $R_{ov} \leq R_{hv} < N$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.

В стационарном режиме состояние соты в произвольный момент времени описывается двумерным вектором $\mathbf{n}=(n_v, n_d)$, где n_v и n_d указывают количество речевых вызовов в каналах и суммарное число вызовов данных в системе, соответственно. В состоянии \mathbf{n} число d-вызовов в каналах (n_d^s) и в очереди (n_d^q) определяются так:

$$n_d^s = \min\{N - n_v, n_d\}, \quad n_d^q = (n_v + n_d - N)^+,$$

где $x^+ := \max(0, x)$. Доказано, что справедливо следующее

Утверждение 6. Показатели QoS модели определяются так:

$$P_{hv} := \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) \left(\delta(n_v, R_{hv}) + (1 - \delta(n_v, R_{hv})) I(n_v + n_d^s \geq N) \right), \quad (27)$$

$$P_{ov} := \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) \left(I(n_v \geq R_{ov}) + I(n_v < R_{ov}) I(n_v + n_d^s \geq N) \right). \quad (28)$$

$$P_{od} := \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) I(n_v + n_d^s \geq N). \quad (29)$$

$$L_{hd} := \sum_{k=1}^{\infty} k \xi(k), \quad (30)$$

где L_{hd} обозначает число hd-вызовов в очереди и $\xi(k) := \sum_{\mathbf{n} \in S} p(\mathbf{n}) \delta(n_d^q, k)$.

Показано, что в данной системе не выполняется условие локального баланса, т.е. не существует мультипликативного решения указанной СУР. Альтернативный подход к решению данной проблемы, основанный на использовании метода двумерных производящих функций оказывается громоздким и неконструктивным даже для моделей малой размерности и при простых схемах доступа. В связи с этим, в работе предлагается подход, который позволяет для приближенного расчета показателей QoS разработать простые вычислительные процедуры. При выполнении условия эргодичности модели, т.е. $v_d < N - R_{hv}$, в работе получены следующие приближенные формулы для расчета показателей QoS (27)-(30):

$$P_{hv} \approx \pi(< k >) + \sum_{k=0}^{R_{hv}-1} \pi(< k >) \left(1 - \rho_k(0) \sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{v_d^i}{i!} \right); \quad (31)$$

$$P_{ov} \approx \sum_{k=R_{ov}}^{R_{hv}} \pi(< k >) + \sum_{k=0}^{R_{ov}-1} \pi(< k >) \left(1 - \rho_k(0) \sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{v_d^i}{i!} \right); \quad (32)$$

$$P_{od} \approx \sum_{k=0}^{R_{hv}} \pi(< k >) \left(1 - \rho_k(0) \sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{v_d^i}{i!} \right); \quad (33)$$

$$L_{hd} \approx \sum_{k=0}^{R_{hv}} \pi(< k >) \cdot L(M | M | N - k | \infty). \quad (34)$$

Входящие в формулы (31)-(34) величины вычисляются так:

$$\rho_k(0) = \left(\sum_{i=0}^{N-k} \frac{v_d^i}{i!} + \frac{v_d^{N-k}}{(N-k)!} \cdot \frac{v_{hd}}{N-k-v_{hd}} \right)^{-1};$$

$$\pi(< k >) = \begin{cases} \frac{v_v^k}{k!} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \alpha_i \cdot \pi(< 0 >), & \text{если } 1 \leq k \leq R_{ov}, \\ \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{R_{ov}} \cdot \frac{v_{hv}^k}{k!} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \alpha_i \cdot \pi(< 0 >), & \text{если } R_{ov} + 1 \leq k \leq R_{hv}, \end{cases}$$

$$\pi(< 0 >) = \left(\sum_{k=0}^{R_{ov}} \frac{v_v^k}{k!} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \alpha_i + \left(\frac{v_v}{v_{hv}} \right)^{R_{ov}} \cdot \sum_{k=R_{ov}+1}^{R_{hv}} \frac{v_{hv}^k}{k!} \cdot \prod_{i=0}^{k-1} \alpha_i \right)^{-1},$$

$$\alpha_k := \rho_k(0) \sum_{i=0}^{N-k-1} \frac{v_d^i}{i!}, \quad k = 0, 1, \dots, R_{hv} - 1;$$

$$L(M | M | N - k | \infty) = \rho_k(0) \cdot \frac{v_d^{N-k}}{(N-k)!} \cdot \frac{v_{hd}(k)}{(1 - v_{hd}(k))^2},$$

где $v_{hd}(k) := v_{hd}/(N - k)$.

Изучена также модель мультисервисной сети с очередями при САС, основанной на схеме резервирования каналов. Для этой модели также разработана соответствующая вычислительная процедура.

Для всех типов моделей приводятся результаты численных экспериментов, где изучаются поведения показателей QoS моделей относительно параметров системы, а также относительно изменения параметров используемых стратегий доступа. С помощью численных экспериментов установлена высокая точность разработанных приближенных вычислительных процедур.

Здесь также решены задачи выбора эффективных значений параметров различных стратегий доступа. Так, например, вербальное определение задачи для САС, основанной на стратегии отсечения вызовов, состоит в следующем. Пусть при фиксированных нагрузках заданы верхние пределы для возможных значений вероятностей потерь разнотипных вызовов и средней длины очереди hd-вызовов. Требуется найти такие значения параметров R_{ov} и R_{hv} , чтобы удовлетворить заданные ограничения. Указанная задача математически записывается так: требуется найти такие пары (R_{ov}, R_{hv}) , $R_{ov} \leq R_{hv}$, при которых удовлетворяются следующие ограничения:

$$P_{hv} \leq \varepsilon_{hv}, \quad (35)$$

$$P_{ov} \leq \varepsilon_{ov}, \quad (36)$$

$$P_{od} \leq \varepsilon_{od}, \quad (37)$$

$$L_{hd} \leq l_{hd}, \quad (38)$$

где $\varepsilon_{hv}, \varepsilon_{ov}, \varepsilon_{od}, l_{hd}$ являются заданными величинами.

В работе разработан алгоритм решения данной задачи. Исходные данные тестовых задач (35)-(38) для гипотетической модели выбраны так: $N=20, \lambda_{ov}=0.2, \lambda_{hv}=0.1, \lambda_{od}=2, \lambda_{hd}=1, \mu_v=0.1, \mu_d=2$. Для наглядности результаты решения этой задачи при различных ограничениях на значения вероятностей потери разнотипных заявок сведены в таблице 5, где символ \emptyset означает, что задача не имеет решения.

В работе решена аналогичная оптимизационная задача для САС, основанной на стратегии резервирования каналов и даны результаты численных экспериментов.

Таблица 5. Результаты решения задачи (35)-(38)

Номер варианта	ε_{ov}	ε_{od}	ε_{hv}	ε_{hd}	$[R_{ov}^*, R_{ov}^{**}]$		
					$R_{hv}=10$	$R_{hv}=13$	$R_{hv}=16$
1	E-02	4E-07	5E-05	5E-05	∅	[8,13]	[8,16]
2	E-02	E-07	E-04	E-08	[8,8]	[8,13]	[8,16]
3	E-02	E-07	E-04	E-10	[8,8]	[8,8]	[8,8]
4	E-02	E-07	E-04	E-09	[8,8]	[8,11]	[8,11]
5	E-01	E-06	E-04	E-10	[6,8]	[6,8]	[6,8]
6	5E-02	4E-09	5E-04	2E-10	[7,9]	[7,8]	[7,8]
7	8E-02	4E-08	5E-09	5E-10	∅	∅	[6,9]
8	8E-02	4E-08	5E-05	5E-08	[6,7]	[6,13]	[6,16]
9	15E-02	4E-07	5E-05	5E-12	[5,5]	[5,5]	[5,5]
10	15E-02	4E-07	5E-06	5E-11	[5,5]	[5,7]	[5,7]

В пятой главе диссертации исследуются проблемы локального управления ресурсами в узлах сетей коммутации пакетов мультимедийного трафика. Все передаваемые в сети пакеты делятся на два класса: пакеты сообщений реального времени (rt-пакеты) и пакеты сообщений нереального времени (nrt-пакеты). Отмечено, что классические приоритетные схемы не являются эффективными при организации процесса буферизацию в узлах СКП, обрабатывающей трафики реального и нереального времени, так как rt-пакеты являются чувствительными к возможным задержкам и толерантны к потерям, в то время как nrt-пакеты чувствительны к потерям и толерантны к задержкам. Отсюда делается вывод, что при использовании общих ресурсов сети необходимо ввести в рассмотрении множественных приоритетов (Multiply Priorities). Под множественными приоритетами понимаются такие системы приоритетов, когда вызовы одного типа имеют высокие приоритеты при поступлении в очередь (в отношении вызова другого типа) и одновременно имеют низкие приоритеты (в отношении вызова другого типа) при выборе из очереди для обслуживания.

Рассмотрена следующая модель управления буфером узла коммутации СКП с использованием множественных приоритетов. Буферное пространство размера B , $B < \infty$, и исходящий канал коммутатора используются совместно пакетами обоих типов, при этом пакеты первого типа представляют трафик нереального времени, пакеты второго типа – трафик реального времени. Предполагается, что для обоих трафиков время передачи пакетов по исходящему каналу распределено показательно с общим средним μ^{-1} .

Множественные приоритеты определяются следующим образом. Поскольку трафик первого типа (nrt-пакеты) является более чувствительным к возможным потерям пакетов, чем трафик второго типа (rt-пакеты), то они (т.е. пакеты первого типа) имеют высокие пространственные приоритеты. Эти приоритеты осуществляются с помощью стратегии доступа с вытеснением. Согласно этой стратегии доступа пакет первого типа теряется лишь тогда, когда буфер полностью заполнен и число пакетов данного типа в буфере не меньше c , $1 \leq c \leq B$. Иными словами, поступивший пакет первого типа вытесняет из полностью заполненного буфера пакета второго типа, если текущее число пакетов первого типа меньше c ; в противном случае поступивший пакет первого типа теряется. Пакеты второго типа теряются тогда, когда буфер полностью заполнен. Временные приоритеты определяются так. Поскольку трафик второго типа является более чувствительным к возможным задержкам в очереди, чем трафик первого типа, то пакеты второго типа имеют высокие относительные временные приоритеты.

Основные показатели QoS сети являются вероятность потери пакетов (Cell Loss Probability, CLP) индивидуальных (срочных и несрочных) трафиков из-за ограниченности буфера в узлах сети и задержка передачи пакетов (Cell Transfer Delay, CTD) индивидуальных трафиков.

Функционирование буфера описывается двумерной цепью Маркова с состояниями типа $\mathbf{n}=(n_1, n_2)$, где n_i указывает число пакетов i -го типа в очереди, $i=1,2$. Тогда ФПС модели задается так: $S := \{\mathbf{n} : 0 \leq n_i \leq B; n_1 + n_2 \leq B\}$. Доказано, что справедливо

Утверждение 7. Стационарные вероятности потери разнотипных пакетов определяются так:

$$CLP_1(B, c) = \sum_{\mathbf{n} \in S_d} p(\mathbf{n}) I(n_1 \geq c); \quad (39)$$

$$CLP_2(B, c) = \sum_{\mathbf{n} \in S_d} p(\mathbf{n}) + \frac{v_1}{1 + v_1} \sum_{\mathbf{n} \in S_d^c} p(\mathbf{n}), \quad (40)$$

где $S_d := \{\mathbf{n} \in S : n_1 + n_2 = B\}$, $S_d^c := \{\mathbf{n} \in S_d : n_1 < c\}$.

Среднее число пакетов i -го типа в очереди ($Q_i(B, c)$) определяется следующим образом:

$$Q_i(B, c) := \sum_{k=1}^B k \xi_i(k), \quad (41)$$

где $\xi_i(k) := \sum_{n \in S} p(n) \delta(n_i, k)$, $i=1,2$.

Среднее время задержки пакетов i -го типа в очереди находится из модифицированной формулы Литтла. При точном подходе значения искомым показателей QoS определяются через стационарное распределение исходной цепи Маркова. Получен явный вид СУР для стационарных вероятностей состояний и указано, что она имеет сложную матрицу. Этот факт существенным образом осложняет проблемы расчета показателей QoS модели (39)-(41), особенно при больших размерах буфера.

После соответствующих математических преобразований получены следующие приближенные формулы для вычисления искомым параметров:

$$CLP_1(B, c) \approx \sum_{i=c+1}^B L(v_2, B-i) \pi(< i >); \quad (42)$$

$$CLP_2(B, c) \approx \sum_{i=0}^B L(v_2, B-i) \pi(< i >) + \frac{v_1}{1+v_1} \sum_{i=0}^{c-1} L(v_2, B-i) \pi(< i >); \quad (43)$$

$$Q_1(B, c) \approx \sum_{k=1}^B k \pi(< k >); \quad (44)$$

$$Q_2(B, c) \approx \sum_{k=1}^B k \sum_{i=0}^{B-k} \pi(< i >) \rho_i(k); \quad (45)$$

Входящие в формулы (42)-(45) величины вычисляются так:

$$\rho_i(j) = \begin{cases} v_2^j \frac{(1-v_2)}{B-i+1}, & \text{если } v_2 \neq 1, \\ \frac{1}{B-i+1}, & \text{если } v_2 = 1; \end{cases}$$

$$\pi(< i >) = \begin{cases} v_1^i \left(\prod_{j=1}^i \rho^j(0) \right)^{-1} \pi(< 0 >), & \text{если } 1 \leq i \leq c, \\ v_1^i \left(\prod_{j=1}^i \rho^j(0) \right)^{-1} \left(\prod_{j=B-i+1}^{B-c} (1-L(v_2, j)) \right) \pi(< 0 >), & \text{если } c+1 \leq i \leq B, \end{cases}$$

$$\pi(< 0 >) = \left(\sum_{i=0}^c v_1^i \left(\prod_{j=1}^i \rho^j(0) \right)^{-1} + \sum_{i=c+1}^B v_1^i \left(\prod_{j=1}^i \rho^j(0) \right)^{-1} \prod_{j=B-i+1}^{B-c} (1-L(v_2, j)) \right)^{-1},$$

где $L(v, k) := v^k(1-v)/(1-v^{k+1})$ означает вероятность потери в классической

системе обслуживания $M/M/1/k$ с нагрузкой ν erl.

Анализ численных результатов показал, что приближенные и точные значения изучаемых показателей QoS очень близки. Также показано преимущества приближенного подхода перед точным подходом (см. табл.6), где TA и TE обозначают требуемое время для решения задачи при использовании приближенного и точного подхода. Из этой таблицы видно, что с ростом объема буфера эффективность использования разработанного подхода также растет, и показательно, что для решения задачи с использованием приближенного подхода в некоторых случаях требуется 1000 раз меньше времени, чем при использовании точного подхода.

Табл.6. Сравнение времени решения задачи расчета показателя QoS модели при различных подходах.

Размер буфера	30	40	45	50	55	60
TA/TE	0.02	0.01	0.005	0.004	0.003	0.001

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

Приложения включает документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработаны точный и приближенный методы расчета многоскоростной модели Эрланга с рандомизированной стратегией доступа и полученные результаты применены для моделей мультисервисных систем. Показана высокая точность приближенных формул.

2. Предложена новая стратегия доступа в мультисервисных ССС, основанная на схеме отсечения вызовов. Разработаны точный и приближенный методы расчета показателей QoS предложенной стратегии. Показана высокая точность приближенных формул.

3. Рассмотрены оптимизационные задачи по выбору надлежащих значений параметров различных стратегий доступа, которые позволяют удовлетворить требуемый уровень качества

обслуживания. Разработаны алгоритмы решения рассмотренных задач и даны результаты вычислительных экспериментов.

4. Предложен подход для определения оптимальной стратегии доступа, который предлагает использовать методы теории Марковских процессов принятия решений. Сформулирован явный вид задачи оптимизации и показан, что для ее решения могут быть использованы классические методы оптимизации.

5. Разработан унифицированный подход к изучению моделей моносервисных ССС при наличии очереди (конечной и бесконечной) вызовов обоих типов (новые и хэндовер вызовы). При этом учитываются нетерпеливость вызовов обоих типов. Для моделей с бесконечными очередями установлены условия их эргодичности.

6. Разработаны численные методы исследования моделей мультисервисных ССС при наличии лишь очереди (конечной и бесконечной) вызовов нереального времени. Для моделей с бесконечными очередями установлены условия их эргодичности. Разработаны алгоритмы решения задач параметрической оптимизации для различных стратегий доступа с целью нахождения надлежащих значений их параметров.

7. Предложен новый класс множественных приоритетов в системах с ограниченными общими очередями для вызовов реального и нереального времени. В них вызовы нереального времени имеют высокие абсолютные приоритеты на входе в буфер и низкие относительные приоритеты при выборе для обслуживания, а вызовы реального времени, наоборот, имеют высокие относительные приоритеты при выборе для обслуживания и низкие приоритеты на входе в буфер. Предложены методы расчета таких моделей и решены задачи их параметрической оптимизации.

Достоверность и обоснованность научных и практических выводов диссертационной работы подтверждается корректным применением основополагающих результатов математической теории телетрафика и результатами объемных вычислительных экспериментов.

Практическая ценность работы заключается в том, что использование разработанных в ней методов, моделей, алгоритмов и программных средств позволяют повысить эффективность функционирования МСТ на стадии их эксплуатации за счет реализации оптимальной стратегии доступа и схемы обработки.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Нагиев Ф.Н. Подход фазового укрупнения для оптимизации стратегий доступа в сетях коммутации пакетов // **Кибернетика и системный анализ. 2004. №2. С.107-115.**
2. Меликов А.З., Пономаренко Л.А., Фаттахова М.И. Численные методы для исследования многопоточковых систем обслуживания с виртуальным разделением общего буфера // **Кибернетика и системный анализ. 2004. №6. С.162-172.**
3. Меликов А.З., Пономаренко Л.А., Фаттахова М.И. Стратегия вытеснения с виртуальным порогом для доступа в буфер узла интегральной сети // **Проблемы управления и информатики. 2004. №4. С.106-115.**
4. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Бабаев А.Т. Расчет и оптимизация процессов обработки сообщений в беспроводных коммуникационных сетях сотовой связи // **Автоматика и вычислительная техника. 2004. №4. С.63-72.**
5. Фаттахова М.И., Бабаев А.Т. Анализ характеристик процессов обслуживания вызовов в сотовых сетях связи // **Proceedings of the 18th International Conference “Queues, Systems, Networks”. Minsk, 2005. P.26-31.**
6. Меликов А.З., М.И.Фаттахова, А.Т.Бабаев. Исследование сотовых сетей связи с индивидуальными каналами для обслуживания хэндовер вызовов // **Автоматика и вычислительная техника. 2005. №3. С.71-81.**
7. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Казиев Т.С. Численные методы исследования многоскоростных систем обслуживания типа Гимпельсона // **System research & information technologies. 2005. № 2. С.83-96.**
8. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Казиев Т.С. Метод исследования характеристик многоскоростных сетей обслуживания с одним ресурсом и потерями // **Электронное моделирование. 2005. Т. 27, № 5. С.35-45.**
9. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Казиев Т.С. Анализ и оптимизация многоскоростной системы обслуживания со стратегией резервирования каналов // **Электронное моделирование. 2006. Т. 28, № 5. С.71-85.**
10. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Казиев Т.С. Многоскоростная система со специализированными каналами для обслуживания

широкополосных заявок // **Автоматика и вычислительная техника. 2006. №2. С.15-25.**

11. Fattakhova M.I., Rustamov A.M. Numerical methods for performance analysis of queuing-blocking system with two types of traffics and guard channels // **Proceedings of the International Conference Problems of Cybernetics and Informatics. Baku, 2006. Vol.1. p.172-175.**

12. Məlikov A.Z., Fəttahova M.İ. Şəbəkə resurslarından istifadə üsulu (patent) // **Sənaye mülkiyyəti. İxtiralar. Faydalı modellər. Sənaye nümunələri. Bakı, 2007. No.1. Səh.21.**

13. Меликов А.З., Пономаренко Л.А., Фаттахова М.И. Управление мультисервисными сетями связи с буферными накопителями. **Киев: НАУ-друк, 2008. 156 с.**

14. Eom H.Y., Kim C.S., Melikov A.Z., Fattakhova M.I. Approximate method for QoS analysis of multi-threshold queuing model of multi-service wireless networks // **Proceedings of 6th International Workshop on Simulation. St. Petersburg, 2009. P.833-838.**

15. Фаттахова М.И. Расчет модели обслуживания вызовов в мультисервисных сетях сотовой связи с ограниченным доступом // **Proceedings of the 20th International Conference “Queues, Systems, Networks”. Minsk, 2009. P.67-72.**

16. Фаттахова М.И., Ф.Н.Нагиев. Метод расчета показателей качества обслуживания вызовов в мультисервисных беспроводных сотовых сетях связи при многопараметрической стратегии доступа // **Информационные технологии моделирования и управления. 2009. Т. 58, №6. С.842-849.**

17. Melikov A.Z., Fattakhova M.I. Algorithmic approach to QoS analysis of wireless cellular networks // **Transport and Telecommunication. 2009, Vol.10, no.3. P.24-33.**

18. Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Fattakhova M.I. State space merging approach to performance analysis of cellular wireless networks with queues // **Proceedings of the International Conference Modern Stochastic: Theory and Applications II. Kiev, 2010. P. 68-70.**

19. Меликов А.З., Фаттахова М.И., Нагиев Ф.Н. Модели беспроводных сетей микросотовой структуры с нетерпеливыми вызовами // **Материалы международной научной конференции Моделирование-2010. Киев. Том 2. С. 246-253.**

20. Melikov A.Z., Fattakhova M.I., Kim C.S., Eom H. Approximation method for QoS analysis of wireless cellular networks with impatient calls

// **Industrial Engineering & Management Systems. 2010. Vol.19, no.4. P.339-347.**

21. Меликов А.З., Фаттахова М.И. Моделирование беспроводных сотовых сетей связи с нетерпеливыми вызовами // **Автоматика и вычислительная техника. 2010. №1. С.45-57.**

22. Ох Я.Д., Ким Ч.С., Меликов А.З., Фаттахова М.И. Численный анализ многопараметрической стратегии доступа в мультисервисных беспроводных сотовых сетях связи // **Автоматика и телемеханика. 2010. №12. С.70-85.**

23. Baek J.H., Kim C.S., Melikov A.Z., Fattakhova M.I. Performance analysis of multi-parametric call admission control strategies in un-buffered multi-service cellular wireless networks // **Wireless Sensor Networks. 2010. Vol.2, no.3. P.218-226.**

24. Фаттахова М.И. Точный метод расчета сотовых сетей связи со стратегией резервирования каналов // **Управляющие системы и машины. 2010. №5. С.61-64.**

25. Фаттахова М.И. Анализ моделей беспроводных сотовых сетей связи с ограниченными очередями разнотипных вызовов // **Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri. 2010. №1. S.148-156.**

26. Фаттахова М.И. Аналитический метод расчета сетей передачи речи и данных с рандомизированной стратегией доступа // **Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri. 2010. Cild 12, №2. S.64-70.**

27. Фаттахова М.И. Об одном подходе к анализу многоскоростной модели коммуникационных сетей // **Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələri. 2010. Cild 12, №3. S.20-26.**

28. Фаттахова М.И. Анализ многопараметрической стратегии доступа в мультисервисных беспроводных сотовых сетях связи // **Электронное моделирование. 2010. Т.32, №1. С.33-44.**

29. Меликов А.З., Пономаренко Л.А., Фаттахова М.И. Приближенный расчет моделей беспроводных сетей микросотовой структуры с очередями разнотипных вызовов // **Кибернетика и системный анализ. 2010. №3. С.126-138.**

30. Фаттахова М.И. Приближенный анализ показателей качества обслуживания в беспроводных сетях микросотовой структуры // **System Research and Information Technologies. 2011. №1. С.87-98.**

31. Фаттахова М.И. Анализ модели мультисервисной беспроводной сети связи с очередями вызовов нереального времени // **Кибернетика и вычислительная техника. 2011. Выпуск 163. С.22-29.**

32. Melikov A.Z., Kim C.S., Fattakhova M.I. An analytical approach for study of cellular wireless networks with randomized access strategy // **Proceedings of the 21st International Conference “Queues, Systems, Networks”**. Minsk. 2011. P.283-288.
33. Melikov A.Z., Fattakhova M.I. Numerical approach to performance analysis of multi-parametric CAC in wireless networks // **Cellular networks. Positioning, Performance Analysis, Reliability**. Intech, 2011. P.169-192.
34. Kim H.M., Melikov A., Fattakhova M., Kim C.S. An analytical approach to the analysis of guard-channel-based call admission control in wireless cellular networks // **Journal of Applied Mathematics**. Vol. 2012. Article ID 67658. doi: 10.1155/2012/676582. 14 p.

В совместно опубликованных работах [1]-[3] автором предложены стратегии доступа в буфер и метод расчета их характеристик; в [4]-[6] разработаны точные и приближенные методы изучения моделей моносервисных ССС; в [7]-[10] предложены методы расчета и оптимизации многоскоростных моделей при различных стратегиях доступа; в [11] предложен численный метод расчета смешанной модели системы обслуживания с двумя типами вызовов и резервными каналами; в [12] предложена схема доступа в буфер; в [13] предложены множественные приоритеты и методы расчета и оптимизации моделей с такими приоритетами; в [14]-[17] предложены многопараметрические стратегии доступа в ССС без очередей и разработаны методы их расчета; в [18] предложен метод фазового укрупнения для моделей с очередями; в [19]-[21] разработаны приближенные методы расчета моделей ССС с конечными очередями и нетерпеливыми вызовами; в [22] и [23] автору принадлежит стратегии доступа и методы их расчета; в [29] автор разработал формулы для приближенного расчета моделей с конечными и бесконечными очередями; в [32]-[34] автор ввел рандомизированную стратегию доступа и аналитический метод изучения модели. Во всех работах численные эксперименты и анализ их результатов выполнены автором.

FƏTTAHOVA MEHRIBAN İSA QIZI

MULTİ-SERVİSLİ XİDMƏT ŞƏBƏKƏLƏRİNİN MODELƏRİNİN

ANALİZİ VƏ OPTİMALLAŞDIRILMASI ÜSULLARI

XÜLASƏ

Dissetasiya işində multi-xidmətli şəbəkələrin işinin spesifik cəhətlərini nəzərə alan riyazi modellər yaradılmış və bu modellərin analizi və optimallaşdırılması üçün səmərəli üsullar təklif olunmuşdur.

Əvvəlcə çoxsürətli və bufersiz Erlang modellərində təsadüfi giriş strategiyası təyin olunur və göstərilir ki, bir çox məlum daxilolma sxemləri təklif olunan strategiyadan xüsusi hal kimi alınır. Bu tip modellərdə istənilən sayda kanallar və trafik tipləri olduğu hallarda onların keyfiyyət göstəricilərinin hesablanması üçün yeni analitik üsul təklif olunmuşdur. Təklif olunan modellərin və üsulun bir sıra naqillə və naqilsiz multi-servisli şəbəkələrdə tətbiqi verilmişdir. Həmçinin çoxsürətli Erlang modellərində sistemdəki sorğuların sayına məhdudiyət qoyan daxilolma strategiyası təklif olunmuş və isbat olunmuşdur ki, bu strtegiyadan istifadə etdikdə sistemin riyazi modeli olan uyğun Markov zəncirinin stasionar paylanması multiplikativ şəkildədir. Xidmət prosesinin keyfiyyət göstəricilərinin verilmiş tələblərə cavab verməsini təmin etmək üçün uyğun optimallaşdırma məsələləri qoyulmuş və onların həlli alqoritmləri təklif olunmuşdur.

Mono-servisli və multi-servisli naqilsiz şəbəkələrdə sonlu və sonsuz ölçülü buferlər olduğu hallarda onların riyazi modelləri yaradılmışdır. Bu zaman kanalların ehtiyatlanmasına və sistemdəki sorğuların sayına məhdudiyət qoyan sxemə əsaslanan daxilolma strategiyalarından istifadə edilə bilər. Baxılan modellərin dəqiq və təqribi analizi üçün səmərəli üsullar təklif olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, dəqiq üsullar yalnız ölçüləri çox da böyük olmayan modellərin analizi üçün istifadə oluna bilərlər və təklif olunan təqribi üsulların verdiyi nəticələr dəqiq hallara çox yaxındır. Bu şəbəkələrdə keyfiyyət göstəricilərinin optimallaşdırılması üçün də üsullar verilmişdir.

Göstərilmişdir ki, paketlərin kommutasiyası şəbəkələrində istifadə edilən klassik prioritetlər bir sıra hallarda keyfiyyət göstəricilərinə qoyulan tələblərə cavab verə bilmirlər və buna görə də yeni tip prioritetlər təklif olunur. Bu prioritetlərdən istifadə edildikdə real zamanda ötürülən paketlər yüksək zaman prioritetinə, qeyri-real zamanda ötürülən paketlər isə yüksək fəza prioritetinə malik olurlar. Belə prioritetlərdən istifadə etdikdə baxılan şəbəkələrdə keyfiyyət göstəricilərinin hesablanması və optimallaşdırılması üsulları təklif olunmuşdur.

Fattakhova Mehriban Isa
METHODS FOR ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF
MODELS OF MULTISERVICE NETWORKS
SUMMARY

In this work adequate mathematical models of multiservice networks are proposed. Effective methods for analysis and optimization of these models are developed.

Randomized call admission control (CAC) scheme in bufferless and multirate Erlang's models is introduced. It is proved that many well-known CAC schemes are special cases of proposed one. A new analytical method to calculate quality of service (QoS) metrics in such models with arbitrary number of channels and types of traffic is developed. The proposed models and methods are applied in wired and wireless networks. Cutoff CAC in bufferless and multirate Erlang's models is introduced. It is proved that appropriate Markov chain has multiplicative solution. The optimization problems to satisfy QoS requirements are set and algorithms to their solution are developed.

Mathematical models of both mono-service and multi-service wireless networks with finite and infinite buffers are developed. In these models both CAC based guard channels scheme and CAC based on cutoff scheme are used. A new exact and approximate methods to analysis of these models are proposed. It is shown that exact method can be used in models with moderate dimension only while approximate methods might be used in models with arbitrary dimension. High accuracy of approximate method is shown. The methods for optimization of QoS metrics in these networks are developed.

It is shown that classic priority schemes does not satisfy required QoS level in packet switching networks. And for this reason a new priority scheme are proposed. In accordance this scheme real-time packets has high time priority while non-real-time packets has high space priority. The methods to calculation and optimization of QoS metrics in networks with such multiple priorities are developed.