

На правах рукописи

Чернушевич Александр Викторович

**Влияние гистерезиса управления трафиком на использование
ресурса узла беспроводных систем передачи информации**

Специальность 05.12.13 -
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2012

Работа выполнена на базовой кафедре «Информационных сетей и систем» при ИРЭ РАН Федерального Государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования Московский технический университет связи и информатики (ФГОБУ ВПО МТУСИ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Цитович Иван Иванович

Официальные оппоненты: Степанов Сергей Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ОАО «Интеллект Телеком», директор
информационно-аналитического департа-
мента

Ефимушкин Владимир Александрович
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФГУП ЦНИИС, заместитель
генерального директора по научной де-
ятельности

Ведущая организация: ФГОБУ ВПО Российский Университет
Дружбы Народов

Защита состоится «12» апреля 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д.219.001.03 на базе Московского технического университета связи и информатики по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ.

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д. 219.001.03
к.т.н., доц.

Ерохин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее десятилетие получили широкое развитие беспроводные системы передачи информации (БСПИ). В настоящее время БСПИ практически находятся вне конкуренции по оперативности развертывания, мобильности, цене и широте возможных приложений, во многих случаях представляя для такой страны, как Россия единственное экономически оправданное решение.

Анализ тенденций развития БСПИ показывает, что они все больше становятся мультисервисными и осуществляют передачу информации в реальном масштабе времени (РМВ). При передаче трафика РМВ должны учитываться жесткие требования качества предоставления услуг (QoS). Усложнение характера и рост объема нагрузки в БСПИ приводит к тому, что требуемое качество обслуживания может быть обеспечено только при использовании эффективных методов управления объемами передаваемых потоков. Задача управления потоками сети разбивается на три самостоятельные задачи управления: доступом в сеть, управление потоком на отдельном маршруте сети и управление потоком на отдельной линии сети.

В данной работе рассматриваются метод управления доступом в БСПИ с использованием порогового управления с приоритетами. Одним из механизмов порогового управления является гистерезисное управление, которое использует три типа порогов для контроля перегрузок – порог обнаружения перегрузки, порог снижения перегрузки и порог сброса перегрузки; таким образом, возникает *гистерезис* управления доступом. В данной работе рассмотрено гистерезисное управление трафиком на уровне доступа пользователей к ресурсам БСПИ.

Разработке методов управления доступом, а так же гистерезисного управления посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей М.А. Красносельского, Г.П. Башарина, В.Г. Лазарева Ю.В. Лазарева, К.Е. Самуйлова, С.Н. Степанова, Н.Я. Паршенкова, Ю.В. Гайдамаки, Р. Шерера, Л. Клейнрока, М. Охта, М. Ругана и др.

При использовании таких методов, как правило, устанавливаются два уровня нагрузки в сети. Высокий уровень – когда начинается ограничение на доступ определенной категории пользователей к ресурсам сети, и низкий уровень – когда ограничение снимается, при этом уровни могут устанавливаться индивидуально для каждого сервисного класса. В связи с этим, является актуальной задача исследования влияния ширины и положения гистерезисов при использовании управления доступом, основанного на дифференцированном доступе пользователей к ресурсам сети, при

наличии нескольких сервисных классов и, следовательно, различного взаимного расположения гистерезисов для этих потоков.

Объектом исследования является процесс предоставления (выделения) ресурсов запросам на обслуживание сегмента БСПИ.

Предметом исследования являются статистические характеристики качества обслуживания запросов от пользователей различных приоритетов, которые влияют на эффективность распределения ресурсов в сети, исследование которых позволяют усовершенствовать методы обслуживания с целью повышения пропускной способности БСПИ.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертации является разработка метода повышения пропускной способности БСПИ с приоритетным доступом пользователей к ресурсам сети, основанного на управлении трафиком с помощью гистерезиса.

Для достижения поставленной цели в диссертации проведены следующие исследования:

- анализ абонентской базы различных операторов БСПИ для выделения категории пользователей, различающихся по требованиям к уровню QoS;
- разработка математической модели сегмента БСПИ при динамическом управлении потоками с различными приоритетами с гистерезисами;
- разработка алгоритмов расчета характеристик модели сегмента БСПИ при различном расположении гистерезисов;
- исследование влияния различного взаимного расположения гистерезисов при управлении трафиком на характеристики узла БСПИ;
- разработка методики выбора границ гистерезисов и ширина возможного диапазона изменения числа занятых устройств, при котором сохраняются характеристики качества обслуживания на заданном уровне.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы теории сетей связи, теории вероятностей, теории массового обслуживания и методы математического моделирования.

Достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечивается адекватностью используемых методов математической статистики и теории вероятностей, верификацией математической модели, а также сравнением аналитических результатов с результатами математического моделирования.

Научная новизна результатов.

1. Впервые предложена и обоснована математическая модель сегмента БСПИ с управлением доступом пользователей различных категорий при наличии гистерезисов, описываемых объемом занятого ресурса всеми пользователями, а также упрощенная трехпо-

токовая модель с состояниями БСПИ, описываемыми объемом занятого ресурса всеми пользователями в общих передаточных единицах (ОПЕ) при наличии гистерезисов.

2. Получены алгоритмы расчета стационарных вероятностей объема используемого ресурса для упрощенной модели в зависимости от взаимного расположения нескольких гистерезисов.
3. Впервые проведено исследование влияния расположения гистерезисов управления доступом к ресурсам БСПИ на эффективность ее функционирования.

Личный вклад: все основные научные положения и выводы, составляющие содержание диссертации, разработаны соискателем самостоятельно. Теоретические и практические исследования, а также вытекающие из них выводы и рекомендации проведены и получены автором лично.

Практическая ценность и реализация результатов работы: выполненные в диссертационной работе исследования и разработанный метод, а также предложенные инженерные методики могут быть использованы для управления доступом к ресурсам БСПИ для обеспечения надежности функционирования узлов системы передачи информации. Разработанный алгоритм расчета стационарных вероятностей объема используемого ресурса позволяет производить расчеты эффективности использования управления доступом с гистерезисами. Основные результаты диссертационной работы использованы ОАО «СМАРТС», ООО «Информационные бизнес системы», а также применяются в учебном процессе МТУСИ на базовой кафедре Информационных сетей и систем при ИРЭ РАН.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 59 студенческой конференции МТУСИ (Москва, 2006), на 64 и 66 научных сессиях РНТОРЭС им. А.С. Попова (Москва, 2009, 2011), на XI Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (Кисловодск, 2010), на Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2010» (Москва, МИРЭА, 2010), на пятой научной конференции «Технологии информационного общества» (Москва, МТУСИ, 2010, 2011), на Всероссийской конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, РУДН, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, внесенных в перечень журналов и изданий, утвержденных ВАК.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:

1. Актуальность задачи распределения ресурсов БСПИ между пользователями различных категорий для ряда технологий БСПИ.
2. Обоснование перехода к упрощенной трехпоточковой модели, которое показало, что для учета ограничений на доступ к ресурсам сети необходимо различать 4 варианта состояний, когда обслуживаются или не обслуживаются запросы соответствующего потока.
3. Обоснование необходимости использовать достаточно далеко отстоящие гистерезисы для запросов второго и третьего сервисных классов при нагрузке в узле, превосходящей его пропускную способность или близкой к ней.
4. Снижение вероятности настойчивости пользователей, создающих нагрузку третьего сервисного класса, позволяет улучшить показатели эффективности использования ресурсов сети в случае, когда показатель удельной общей нагрузки запросов всех сервисных классов на одну ОПЕ.
5. При перегруженной сети наличие запросов третьего сервисного класса приводит к снижению эффективности БСПИ. В сети за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети можно использовать более полно, однако вырастает вероятность потерь для запросов второго сервисного класса, который чувствителен к выбору границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса. В слабо нагруженной сети за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети используются более эффективно, чем при обслуживании только запросов двух первых классов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 89 наименований и приложения. Основная часть содержит 126 страниц, включая 25 рисунков, 12 таблиц.

ВСОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены практическая ценность и области применения результатов, представлены сведения об апробации работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проведены исследования, позволившие обосновать постановку задачи. В частности, проведен анализ способов управления пропускной способностью систем доступа. Для этого исследованы принципы построения систем доступа. Приведен анализ механизмов повышения пропускной способности телекоммуникационных сетей. Выделен и исследован механизм порогового управления, а именно гистерезисное управление в телекоммуникационных системах в историческом развитии.

Гистерезисное управление – механизм управления нагрузкой, когда для предотвращения перегрузки вводится порог перегрузки, при достижении которого изменяется режим обслуживания поступающей нагрузки, и для устранения колебаний в режиме управления при снижении поступающей нагрузки ниже значения порога перегрузки, возврат к нормальному режиму обслуживания происходит при достижении порога снижения перегрузки.

Проведен исторический обзор использования гистерезисного управления в телекоммуникационных системах. Отмечено, что в работах Шерера Р. Г. рассматривалась комбинированная система обслуживания (КСО), которая обслуживала два входящих разноприоритетных потока вызовов, причем оба потока могли находиться в условиях перегрузки. Было показано, что вероятность потерь приоритетного потока мало зависит от изменения числа мест ожидания и сильно зависит от величины порога. В работах Лазарева В.Г. рассмотрена модель узла коммутации каналов, на который поступали вызовы двух потоков, первый из которых был приоритетным. При этом задавалось минимальное значение порога m_{min} из расчета минимального качества обслуживания вызовов неприоритетного потока. И соответственно, вводилось максимальное значение порога m_{max} , при котором вызовы неприоритетного потока не могли занимать больше m_{max} каналов. Данный метод адаптивного управления порогом был обобщен для k потоков различных категорий.



Рис.1. Гистерезисное управление нагрузкой

Показано, что с начала 90-ых годов гистерезисное управление получило широкое распространение в сетях коммутации каналов, с общеканальной системой сигнализации №7 (рис. 1). В дальнейшем также стало применяться и в IP-сетях, где основой сигнализации является протокол инициации сеансов связи. (SIP – Session Initiation Protocol).

Показано, что БСПИ являются лишь транспортными средами, их инфраструктура фактически формирует каналы для потоков данных различных услуг. Каждое из таких приложений обладает своими требованиями: ко времени доставки, надежности, качеству обслуживания, криптозащите и т.д. Проведена классификация БСПИ, рассмотрены основные стандарты и показаны принципы их построения.

Проанализированы принципы функционирования БСПИ. Показано, что архитектура данных сетей позволяет применять метод дифференцированного обслуживания пользователей с гистерезисным управлением, основанный на выделении различных сервисных классов, т.е. наборов параметров для стандартных приложений. Проведенный анализ абонентской базы различных операторов связи показал, что необходимо различать три типа пользователей в зависимости от требований, предъявляемых ими к QoS, что обосновывает целесообразность ограничиться трехпоточковой моделью управления доступом к ресурсам БСПИ.

Анализ литературы по данной теме показал, что в настоящее время отсутствует применение гистерезисного управления в БСПИ. Поэтому в первой главе сформулирована задача разработки математической модели сегмента БСПИ, учитывающей разные сервисные классы пользователей, их дифференцированный доступ к ресурсам сети, а также гистерезисы, возникающие при управлении доступом к БСПИ.

Основные результаты главы опубликованы в работах [5, 6]

Во второй главе диссертационной работы проведено исследование параметров модели дифференцированного обслуживания различных сервисных классов. Показано, что QoS обеспечивает требуемый уровень обслуживания для каждого класса трафика на сети. Эти классы сеть обрабатывает по-разному, предоставляя каждому классу определенную пропускную способность, заданную временем задержки, джиттер в заданных пределах, уровень ошибок в пакетах и процент их потерь. В главе проведено исследование работ по эффективности применения упрощенных моделей. Проведена формализация процедур связи для построения модели дифференцированного обслуживания различных сервисных классов сегмента БСПИ и ее исследование для дальнейшего упрощения. Это позволило провести оценку характеристик качества совместной передачи с помощью хорошо изученного класса модели теории телетрафика с потерями. Рассмотренная модель дает возможность определить количество ресурса, достаточного для передачи сообщений с заданным качеством.

Построена модель дифференцированного обслуживания различных сервисных классов сегмента БСПИ, которая представлена как совокупность абонентских станций (АС), взаимодействие которых осуществляется через базовую станцию (БС), которая взаимодействует с другими сетями. У БС есть определенный объем частотного ресурса, который используется при предоставлении услуг пользователям, подразделяемый на ресурсные блоки. В соответствии с проведенной формализацией вводится понятие основной передаточной единицы (ОПЕ), которое в данной модели соответствует одному ресурсному блоку.

Между каждой АС и БС возникает поток запросов на выделение ресурсов для предоставления услуг различных сервисных классов. Изменение ситуации в зоне обслуживания данной станции, в частности возникновение перегрузок из-за резкого увеличения запросов, или перекосов нагрузки, ведёт к изменению вероятности предоставления ресурса, вероятности отсутствия ресурсов, вероятности ошибок, и может привести к перегрузке БС. Проведено разбиение пользователей на сервисные классы в зависимости от приоритетов. Число сервисных классов пользователей m ; i -ый сервисный класс ($i=1,m$) обладает своим собственным набором параметров качества обслуживания (рис. 2).

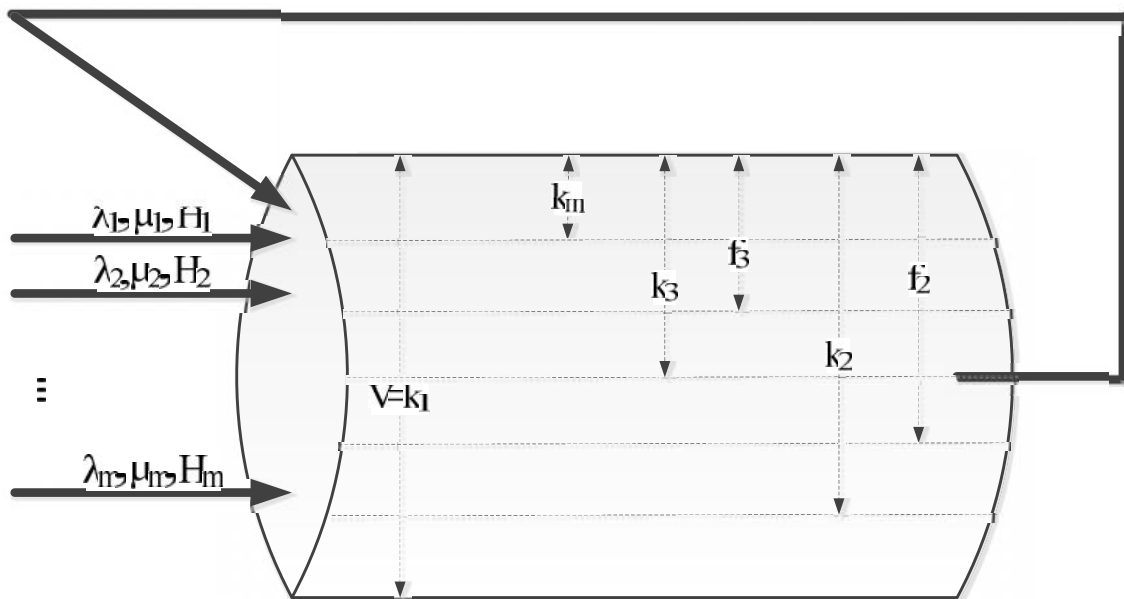


Рис.2. Схема функционирования модели дифференцированного обслуживания вызовов различных категорий на сегменте БСПИ

Математическая модель может быть описана следующим образом: имеется доступный ресурс объемом V , на который поступает m потоков заявок, каждый из них соответствует различным сервисным классам пользователей. Все потоки - стационарные пуассоновские процессы с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$. Время обслуживания вызовов - экспоненциальное, соответственно с параметрами μ_i . Первому потоку доступны все V ресурсов, для обслуживания вызовов второго потока доступны

только k_2 из них, и т. д.; для всех m потоков $k_m < V$. Величина k_m отображает степень загрузки (т.е. количество ресурсов, выделяемых для каждого сервисного класса). При этом, если в момент поступления запроса i -ого сервисного класса все k_i ресурсов заняты – запрос получает отказ. Наряду с k_i для каждого сервисного класса вводится объем занятых в данный момент ресурсов $f_i < k_i$, при достижении которого снимается запрет на доступ запросов i -го потока к ресурсам сети. В результате задается функционал качества работы сегмента БСПИ и определяется каждое оптимальное значение k_i и f_i . В случае отказа в обслуживании запросы могут вернуться в систему с настойчивостью H_i и интенсивностью повторения η_r .

Характеристикой качества обслуживания запросов i -ого сервисного класса является вероятность отказа в обслуживании π_i , значение которой влияет на общую интенсивность запросов этого класса в системе.

Показано, что точное решение задачи в представленном виде невозможно, если число возможных каналов обслуживания V велико, поэтому осуществлен переход к упрощенной модели поступающих потоков. Проведенный в главе 1 анализ тарифных планов у различных операторов показал, что можно ограничиться взаимодействием пользователей трех сервисных классов. Поэтому в дальнейших исследованиях рассмотрена трехпотоковая модель с гистерезисами.

Модель отражает все особенности анализируемой сети, такие как: характер входных потоков, очередность их обслуживания, дисциплина обслуживания и т.д. Остается приемлемой для проведения численного анализа и применения стандартных процедур, развитых в теории телетрафика для решения соответствующих задач. Проведено два упрощения модели: первое состоит в пуассоновской замене потока повторных вызовов. Второе состоит в замене времени обслуживания всех запросов на 1 за счет перерасчета интенсивностей поступления запросов таким образом, что среднее значение занятого ресурса запросами i -го потока остается без изменений. После таких упрощений состояния процесса задаются одним параметром v – объемом используемого ресурса. Вместе с тем, для учета ограничений на доступ к ресурсам сети различаются состояния, когда обслуживаются или не обслуживаются запросы соответствующего потока. Возможны 4 варианта обслуживания запросов второго и третьего потоков, поэтому рассматриваются 4 множества состояний: S^{++} - когда обслуживаются запросы всех трех сервисных классов; S^{+-} - когда прекращаются обслуживаться запросы низшего сервисного класса; S^{--} - когда обслуживаются запросы пользователей только 1 сервисного класса; S^{-+} - когда обслуживаются запросы пользователей только первого и третьего сервисных классов.

Возможны 3 варианта взаимного расположения гистерезисов.

Первый вариант получается в случае, если использовать наиболее строгий по отношению к третьему потоку режим, когда выполняются условия $k_1 = V, V > k_2 > f_2 > k_3 > f_3$. В этом случае возникают только два гистерезиса, которые не пересекаются.

Второй вариант состоит в том, что гистерезисы пересекаются: начало запрета на обслуживание запросов третьего потока находится после уровня, когда начинается обслуживание запросов второго потока, т.е. $V > k_2 > k_3 > f_2 > f_3$.

Наиболее сложный для исследования третий вариант, когда обслуживание третьего потока прекращается раньше, но и включается раньше, чем у второго потока. В принятых обозначениях это означает, что $k_1 = V, V > k_2 > k_3, 0 < f_2 < f_3$.

Основные результаты главы опубликованы в работах [1, 2, 3, 8, 9]

В третьей главе рассмотрены решения системы уравнений статистического равновесия для всех трех вариантов обслуживания поступающих запросов от трех сервисных классов пользователей, в зависимости от расположения гистерезисов. Для экономии места в автореферате приведен алгоритм расчетов стационарных вероятностей в случае, когда гистерезис второго сервисного класса включает в себя гистерезис третьего сервисного класса.

Для составления системы уравнений статистического равновесия рассмотрено 10 случаев состояний (рис.3), т.е. выход или вход во множества S^{++}, S^{+-}, S^{-+} и S^{--} . Также для составления уравнения равновесия потребовалось ввести интенсивность «перетекания вероятности» между группами состояний. Пусть x_1 – интенсивность «перетекания вероятности» из группы состояний S^{+-} в группу S^{--} , x_2 - из группы состояний S^{+-} в группу S^{++} , x_3 - из группы состояний S^{-+} в группу S^{--} , x_4 - из группы состояний S^{++} в группу S^{+-} , x_5 - из группы состояний S^{--} в группу S^{-+} и x_6 - из группы состояний S^{-+} в группу S^{++} . Тогда получаем следующие соотношения. Тогда получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} x_6 &= x_1; \\ x_4 &= x_1 + x_2; \\ x_5 &= x_1 + x_3. \end{aligned}$$

Следовательно, для определения стационарных вероятностей необходимо найти значения трех неизвестных x_1, x_2 и x_3

Разработан алгоритм вычисления стационарных вероятностей, который представлен ниже, для случая, когда один гистерезис включает в себя гистерезис другого:

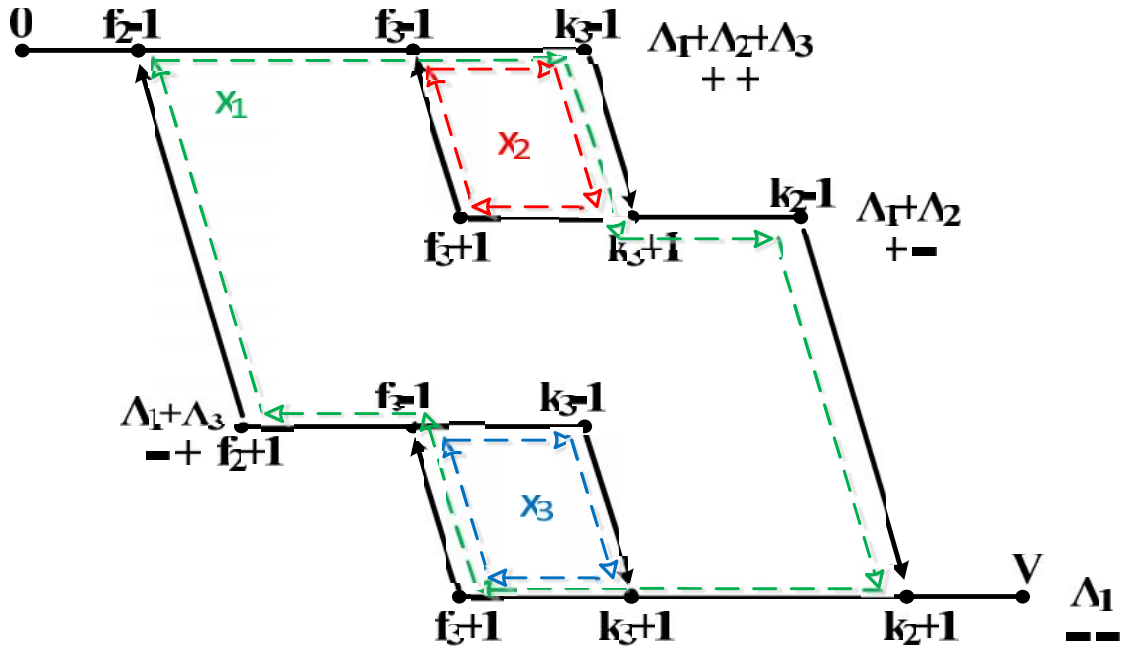


Рис.3. Вид состояний в случае, когда один гистерезис содержит внутри себя другой гистерезис.

1. Полагаем $x_1 = 1$.
2. Вычисляем $p_{k_2-1}^{+-}$ по формуле $p_{k_2-1}^{+-} = \frac{x_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2}$.
3. Вычисляем p_v^{+-} по формуле $p_v^{+-} = \frac{p_{v+1}^{+-}(v+1) + x_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2}$, $v = k_3, \dots, k_2 - 2$.
4. Находим значение C_1 по формуле $p_{k_3}^{+-} = C_1 x_1$.
5. Полагаем $x_2 = 1$.
6. Вычисляем $p_{f_3+1}^{+-}$ по формуле $p_{f_3+1}^{+-} = \frac{x_2}{f_3 + 1}$.
7. Вычисляем p_v^{+-} по формуле $p_v^{+-} = \frac{p_{v-1}^{+-}(\Lambda_1 + \Lambda_2) + x_2}{v}$, $v = f_3 + 2, \dots, k_3$.
8. Находим значение C_2 по формуле $p_{k_3}^{+-} = C_2 x_2$.
9. Вычисляем x_2 по формуле $x_2 = \frac{C_1}{C_2} x_1$.
10. Пересчитываем все вероятности, вычисленные в п. 5 и 6, с новым значением x_2 .
11. Вычисляем $p_{f_2+1}^{-+}$ по формуле $p_{f_2+1}^{-+} = \frac{x_1}{f_2 + 1}$.
12. Вычисляем p_v^{-+} по формуле $p_v^{-+} = \frac{p_{v-1}^{-+}(\Lambda_1 + \Lambda_3) + x_1}{v}$, $v = f_2 + 2, \dots, f_3$.

13. Находим значение C_3 по формуле $p_{f_3}^{-+} = C_3 x_1$.
14. Полагаем $x_3 = 1$.
15. Вычисляем $p_{k_3-1}^{-+}$ по формуле $p_{k_3-1}^{-+} = \frac{x_3}{\Lambda_1 + \Lambda_3}$.
16. Вычисляем p_v^{-+} по формуле $p_v^{-+} = \frac{p_{v+1}^{-+}(v+1) + x_3}{\Lambda_1 + \Lambda_3}$, $v = f_3, \dots, k_3 - 2$.
17. Находим значение C_4 по формуле $p_{f_3}^{-+} = C_4 x_3$.
18. Вычисляем x_3 по формуле $x_3 = \frac{C_3}{C_4} x_1$.
19. Пересчитываем все вероятности, вычисленные в п. 15 и 16, с новым значением x_3 .
20. Вычисляем $p_{k_3-1}^{++} = \frac{x_1 + x_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}$.
21. Вычисляем p_v^{++} по формуле $p_v^{++} = \frac{p_{v+1}^{++}(v+1) + x_1 + x_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}$,
 $v = k_3 - 2, \dots, f_3$.
22. Вычисляем p_v^{++} по формуле $p_v^{++} = \frac{p_{v+1}^{++}(v+1) + x_1}{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}$, $v = f_3 - 1, \dots, f_2$.
23. Вычисляем p_v^{++} по формуле $p_v^{++} = \frac{p_{v+1}^{++}(v+1)}{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}$, $v = f_2 - 1, \dots, 0$.
24. Вычисляем $p_{f_3+1}^{--} = \frac{x_1 + x_3}{f_3 + 1}$.
25. Вычисляем p_v^{--} по формуле $p_v^{--} = \frac{p_{v-1}^{--}\Lambda_1 + x_1 + x_3}{v}$, $v = f_3 + 1, \dots, k_3$.
26. Вычисляем p_v^{--} по формуле $p_v^{--} = \frac{p_{v-1}^{--}\Lambda_1 + x_1}{v}$, $v = k_3 + 1, \dots, k_2$.
27. Вычисляем p_v^{--} по формуле $p_v^{--} = \frac{p_{v-1}^{--}\Lambda_1}{v}$, $v = k_2 + 1, \dots, V$.
28. Вычисляем сумму всех вероятностей по формуле

$$\sum_{v=0}^{k_3-1} p_v^{++} + \sum_{v=f_3+1}^{k_2-1} p_v^{++} + \sum_{v=f_2+1}^{k_3-1} p_v^{-+} + \sum_{v=f_3+1}^V p_v^{--} = 1.$$
29. Обратную величину суммы полагаем равной x_1
30. Проводим нормировку вероятностей, путем умножения всех вероятностей на x_1 .

Аналогично разработаны алгоритмы решения системы уравнений статистического равновесия для непересекающихся гистерезисов и для случая с пересекающимися гистерезисами.

Основные результаты главы опубликованы в работах [2, 3, 4, 9, 10]

В четвертой главе проведено численное исследование характеристик трехпоточковой модели, рассмотренной в третьей главе, при различном расположении гистерезисов управления доступом к ресурсам сети для запросов второго и третьего сервисных классов на примере сети LTE. Проведен расчет вероятностей потерь запросов каждого сервисного класса. Расчеты проводились при различной удельной нагрузке на одну ОПЕ, при этом различалась общая нагрузка и нагрузка, создаваемая запросами первого и второго сервисных классов: ρ – общая нагрузка на одну ОПЕ; ρ_{12} – общая нагрузка, создаваемая запросами первых двух сервисных классов, на одну ОПЕ. Кроме того, задавались различные границы гистерезисов и рассматривались все три возможных способа их взаимного расположения.

В качестве выходных характеристик рассматривались вероятности потерь запросов первого класса:

$$\pi_1 = \sum_{v=V+1-a_1}^V (p_v^{++} + p_v^{+-} + p_v^{-+} + p_v^{--}),$$

где a_1 - количество ОПЕ, используемых запросами первого сервисного класса, p_v^{++} , p_v^{+-} , p_v^{-+} , p_v^{--} - стационарные вероятности, которые рассчитываются по формулам, приведенным в третьей главе. Аналогично рассчитывались вероятности потерь для запросов второго и третьего сервисных классов по формулам

$$\pi_2 = \sum_{v=V+1-a_2}^V (p_v^{++} + p_v^{+-} + p_v^{-+} + p_v^{--}) + \sum_{v=0}^{V-a_2} (p_v^{-+} + p_v^{--}),$$

$$\pi_3 = \sum_{v=V+1-a_3}^V (p_v^{++} + p_v^{+-} + p_v^{-+} + p_v^{--}) + \sum_{v=0}^{V-a_3} (p_v^{+-} + p_v^{--}).$$

Было показано, что важное значение имеет интенсивность поступающих запросов с учетом возможности повторных попыток соединения; ее значение вычислялось по формуле:

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{1 - \pi_i H_i}.$$

Также одной из выходных характеристик является показатель эффективности использования ресурсов узла сети, который определялся, как показатель среднего числа занятых ОПЕ

$$m = a_1 \Lambda_1 (1 - \pi_1) + a_2 \Lambda_2 (1 - \pi_2) + a_3 \Lambda_3 (1 - \pi_3).$$

Численное исследование свойств управления при наличии непересекающихся гистерезисов проводилось при различных значениях

нагрузки на одну ОПЕ; при этом рассматривался как случай сильно перегруженного узла, так и менее нагруженного. Фрагмент полученных результатов исследования представлены в табл.

Таблица

Результаты вычислений при $a_1 = 2; a_2 = 3; a_3 = 1; H_1 = 0,9;$
 $H_2 = H_3 = 0,8; V = 100.$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ_1	30	30	30	30	20	20	20	20	20
λ_2	10	10	10	10	10	10	10	10	10
λ_3	30	30	30	30	30	30	30	10	10
ρ	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
ρ_{12}	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
k_2	96	93	93	93	93	96	96	96	96
f_2	94	90	90	90	90	93	93	93	93
k_3	70	70	80	89	80	80	90	90	90
f_3	40	40	75	85	75	75	85	85	88
π_1	0,007	0,002	0,002	0,004	0	0	0,001	0	0
π_2	0,146	0,236	0,262	0,390	0,018	0,007	0,080	0,031	0,016
π_3	0,990	0,991	0,980	0,900	0,956	0,937	0,913	0,374	0,153
Λ_1	30,18	30,05	30,06	30,09	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00
Λ_2	11,26	12,17	12,51	14,49	10,15	10,06	10,68	10,23	10,13
Λ_3	143,45	143,79	138,02	106,70	118,89	119,21	111,04	13,75	11,13
m	89,8	86,0	87,9	90,6	82,0	82,1	90,5	78,3	79,3

Численное исследование при сильно перегруженном узле показало, что при заданных исходных данных происходит практически полная блокировка запросов третьего сервисного класса и не обеспечивается высокое качество обслуживания запросов первых двух сервисных классов. Вместе с тем, за счет выбора границ гистерезиса для запросов второго сервисного класса можно обеспечить высокое качество обслуживания запросов первого сервисного класса.

Сделан вывод, что при неправильном выборе гистерезисов запросы третьего сервисного класса могут оказывать влияние на качество обслуживания запросов более приоритетных классов даже в тех случаях, когда запросы третьего сервисного класса с большой вероятностью блокируются. Поскольку общая нагрузка, создаваемая запросами всех потоков, существенно превосходит пропускную способность узла, то в этих случаях приоритет должен отдаваться более

приоритетным запросам для того, чтобы обеспечить для них приемлемое качество обслуживания. При правильном выборе границ гистерезисов (см. результаты, приведенные в столбцах 5-9) можно обеспечить заданные границы вероятностей отказа в обслуживании для запросов первого и второго сервисных классов, т.е. сделать для них незаметным наличие запросов третьего сервисного класса в тех случаях, когда для обслуживания запросов приоритетных классов имеется достаточное количество ОПЕ.

На основании расчетов сделан вывод, что наличие запросов третьего сервисного класса повышает среднюю обслуженную нагрузку в сети за счет более полного использования ресурсов. Данные, приведенные в 1-4 столбцах, показывают, что при большой перегрузке границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса не оказывают существенного влияния на значение параметра m , однако, существенно влияют на вероятности потерь запросов более приоритетных сервисных классов. Проведенный численный анализ позволяет сделать вывод, что в тех ситуациях, когда общая нагрузка всех потоков оказывается близкой к пропускной способности узла или ее превосходит, то гистерезис запросов третьего сервисного класса должен быть достаточно удален от гистерезиса запросов второго сервисного класса.

Результаты вычислений (см. результаты, приведенные столбцы 8-9) показали, что когда общая нагрузка в сети равна 80% пропускной способности, то при предельном сближении гистерезисов качество обслуживания улучшается для запросов всех сервисных классов. Дальнейшее сближение гистерезисов приводит к их пересечению.

Численное исследование свойств управления доступом с пересекающимися гистерезисами рассматривалось только в области относительно небольших нагрузок, т.к. при большей нагрузке сближение гистерезисов не целесообразно. Данные исследования показали, что если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл на ОПЕ, то при большой доле нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса, целесообразно устанавливать верхнюю границу гистерезиса для запросов третьего сервисного класса выше верхней границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса, т.е. использовать схему, когда один гистерезис содержит внутри себя другой. Если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл на ОПЕ, а доля нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса невелика, то следует использовать пересекающееся расположение гистерезисов, при этом гистерезис для запросов третьего класса должен быть достаточно широким, чтобы обеспечить сохранения режима доступа при колебаниях нагрузки в области ее больших значений.

Проведено исследование свойств «стоимостных функционалов», которое позволяет учитывать объем оказанных услуг с учетом стоимости одной ОПЕ, которая устанавливается различной для запросов каждого сервисного класса, и издержки сети, связанные с установлением соединения, стоимость которых предполагается одинаковой для запросов всех классов. В связи с большим потоком необслуженных запросов третьего сервисного класса не во всех случаях наличие дополнительного потока запросов третьего сервисного класса является экономически обоснованным на основании критериев, задаваемых «стоимостными функционалами». С другой стороны, профиль суточной нагрузки, создаваемой запросами определенного сервисного класса, выглядит обычно таким образом, что имеются периоды времени, когда нагрузка велика, и периоды, когда она существенно меньше. Было проведено численное исследование влияния суточных колебаний нагрузки на эффективность обслуживания запросов третьего сервисного класса, которое показало, что наличие запросов третьего сервисного класса может быть оправданным в том случае, когда у таких запросов невысокая настойчивость в области больших потерь.

Основные результаты главы опубликованы в работах [9, 10, 11]

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модели сегмента БСПИ, учитывающая разные сервисные классы пользователей, их дифференцированный доступ к ресурсам сети, а также гистерезисы, возникающие при управлении доступом БСПИ.
2. Обоснована и исследована упрощенная трехпоточковая математическая модель сегмента БСПИ, учитывающая разные сервисные классы пользователей, их дифференцированный доступ к ресурсам сети, а также гистерезисы, возникающие при управлении доступом БСПИ.
3. Разработаны алгоритмы вычисления стационарных вероятностей трехпоточковой модели в зависимости от расположения гистерезисов.
4. Проведено численное исследование характеристик упрощенной трехпоточковой математической модели при различных уровнях нагрузки и различном взаимном расположении гистерезисов.
5. На основе проведенного численного исследования даны рекомендации по обеспечению ограничений на качество обслуживания запросов высокоприоритетных классов ширина и расположение гистерезиса для запросов третьего сервисного класса в зависимости от общей нагрузки в узле и от нагрузки, создаваемой высокоприоритетными запросами. Вместе с тем, гистерезис всегда можно выбрать таким образом, что будет

поддерживаться заданное качество обслуживания высокоприоритетных запросов.

6. Дана рекомендация по снижению вероятности настойчивости пользователей, создающих запросы третьего сервисного класса, что позволяет повысить эффективность функционирования сети. Наиболее эффективным является вариант, когда в интервалах с высокой общей нагрузкой запросов первых двух сервисных классов, интенсивность потока запросов третьего сервисного класса снижается за счет ухода на альтернативные сети.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих периодических изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Цитович И.И., Чернушевич А.В. Влияние гистерезиса на управление приоритетами в телекоммуникационной сети // Обозрение прикладной и промышленной математики. Т. 15, № 6. 2008. С. 1141-1142.
2. Цитович И.И., Чернушевич А.В. О влиянии гистерезиса управления трафиком на эффективность функционирования мультисервисной сети // Обозрение прикладной и промышленной математики. Т. 17, № 2. 2010. С. 314-315.
3. Чернушевич А.В. Управление распределением ресурсов сегмента беспроводной широкополосной сети // Т-COMM. Телекоммуникации и транспорт. №7. 2011. С.156-159.
4. Tsitovich I.I., Chernushevich A.V. Calculation of stationary probabilities for a three-stream model of control of the access of the resources of a wireless wideband network with hysteresis // Journal of Communication Technology and Electronics. Vol. 56, №12. 2011. P.1543-1551.

В других изданиях

5. Чернушевич А.В. Построение сетей следующего поколения (NGN) на оборудовании фирмы Siemens // 59 студенческая конференция МТУСИ. М.: МТУСИ. 2006. С. 6-7.
6. Цитович И.И., Наумова Е.О., Чернушевич А.В. Влияние гистерезиса при управлении трафиком на характеристики узла мобильной сети // РНТОРЭС им. А.С.Попова. Научная сессия, посвященная Дню радио. V.LXIV. М.: Инсвязьиздат. 2009. С. 343-345.
7. Цитович И.И., Чернушевич А.В. Особенности приоритетного обслуживания при передаче информации в реальном времени в сетях передачи данных // Девятый Международный симпозиум «Интеллектуальные системы» ИНТЕЛС. Владимир. 2010. С. 326-329
8. Чернушевич А.В. Особенности приоритетного обслуживания при передаче информации реального времени в LTE-сетях // Труды Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2010». М.: Энергоатомиздат. Ч. 3. 2010. С. 260-263.

9. Чернушевич А.В. Математическая модель сегмента беспроводной широкополосной сети при дифференцированном обслуживании абонентов // Всероссийская конференция с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем". М.: РУДН. 2011. С. 59–61.
10. Чернушевич А.В. Динамическое управление приоритетами при дифференцированном обслуживании пользователей беспроводной сети // РНТОРЭС им. А.С.Попова. Научная сессия, посвященная Дню радио. В. LXVI. М.: Инсвязьиздат. 2011. С. 295-298.
11. Цитович И.И., Чернушевич А.В. Расчет стационарных вероятностей трехпоточковой модели управления доступом к ресурсам БШС с ги-стерезисами // Информационные процессы. Т. 11, № 2. 2011. С. 348-368.