

На правах рукописи

Паламарчук Ульяна Алексеевна

**Исследование метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов
мультисервисной сети на основе нечеткой логики**

Направление подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
направленность – Сети, системы и устройства телекоммуникаций
программа академической магистратуры

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации
на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИСибГУТИ)

Научный руководитель, к.т.н. доцент

Н.В. Будылдина

Рецензент

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИСибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Увеличение объема применения всевозможных Интернет-услуг, включая доступ к облачным хранилищам, предоставление видео через Интернет, социальные сети, пересылка данных приводит к повышению требований к полосе пропускания и скоростям передачи данных. Вследствие неизменно увеличивающегося количества трафика появляются перегрузки в сети, ухудшающие качество обслуживания и приводящие к избыточному наполнению очередей в маршрутизаторах. Актуальность работы состоит в том, чтобы изучить и смоделировать различные методы управления очередями для улучшения качества обслуживания и уменьшения перегрузки в очередях маршрутизаторов.

Неизменный рост скоростей доступа и увеличение количества пользователей повлечет к скачкообразности пропускных способностей каналов передачи данных и неравномерности интенсивности трафика. Следовательно, непредотвратимо нарастание перегрузок на некоторых участках сети. Нередко общая скорость подключения абонентов на узле доступа, при оказании услуг без гарантии качества, превышает доступную скорость подключения к магистральной сети. К тому же естественно появление перегрузок при авариях на отдельных участках сети и перераспределении трафика или при установлении событий вне сети, но зависимых с неожиданной интенсивностью объёма трафика для передачи.

Часто используются регуляторы на основе нечёткой логики FLC (Fuzzy Logic Controller) в системах автоматического управления процессами со сложной нелинейной динамикой в робототехнике. Эти регуляторы часто используются, в том случае когда, математические методы в качестве описания являются слишком сложным, но можно применять простое качественное описание поведения системы.

Поэтому задача исследования регулятора на основе нечёткой логики FLC для применения в качестве активного метода управления очередями в маршрутизаторе является актуальной.

Объект исследования – процесс обработки трафика в очередях маршрутизаторов для исключения перегрузки в мультисервисной сети.

Предмет исследования – зависимости параметров качества обслуживания от механизма обработки трафика в очередях маршрутизаторов.

Цель работы исследование метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов мультисервисной сети на основе нечеткой логики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) исследовать существующие методы активного управления очередями маршрутизаторов для предотвращения перегрузок;

2) исследовать нечеткий регулятор эффективно регулирующий заполнение очереди в зависимости от интенсивности нагрузки и заполненности буфера;

3) исследование имитационной модели процесса обслуживания пакетов в очереди маршрутизатора и проведение сравнения параметров качества обслуживания трафика при использовании нечеткого регулятора с параметрами

обслуживания, обеспечиваемыми другими методами управления в режиме перегрузки в сети;

4) исследование математической модели нечеткого регулятора трафика и расчет вероятностно-временных характеристик модели;

5) провести сравнение расчетных данных, полученных на математической модели, с данными имитационного моделирования.

Научная новизна работы. Заключается в моделировании методов активного управления очередями на базе NS-2, сравнение имитационных значений параметров с расчетами по существующей математической модели, анализ влияния регулятора нагрузки с нечеткой логикой на процесс обслуживания пакетов в очереди маршрутизатора и влияние при перегрузке маршрутизатора, изучение влияния задержки на среднюю длину очереди в маршрутизаторе.

Практическая значимость. Используемая математическая модель обработки трафика в очередях маршрутизатора с помощью нечёткой логики позволяет рассчитывать вероятностно–временные характеристики подобных систем, а имитационная модель оценивать влияние проектируемой системы на параметры качества обслуживания. Применение метода активного управления очередями FLC в пограничных маршрутизаторах на уровне доступа позволяет прогнозировать задержку в очереди, улучшить параметры качества обслуживания эластичного трафика в условиях перегрузки при недостаточной скорости канала передачи данных или при взрывном росте трафика.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы теории вероятностей, математической статистики, теории массового обслуживания и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) исследована имитационная модель мультисервисной сети, позволяющая сравнить параметры качества различных методов обработки трафика в очередях маршрутизаторов, в момент перегрузки и при сложной нелинейной динамике трафика;

2) исследованный метод обработки трафика в очереди на основе регулятора с нечеткой логикой предотвращает перегрузку и обеспечивает стабилизацию длины очереди около заданного значения;

3) рассчитанные вероятностно-временные характеристики процесса обработки трафика в очереди в маршрутизаторе на базе регулятора с нечеткой логикой с помощью модели с гистерезисным управлением с порогами;

4) результаты сравнения параметров качества передачи данных при использовании традиционных методов TailDrop и RED с методом обслуживания очереди на основе регулятора с нечеткой логикой.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается расчетами с использованием методов математической статистики и теории вероятности, сравнением аналитических результатов с данными, полученными при имитационном моделировании.

Апробация результатов.

1) Материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, Цифровая экономика: взгляд студенчества» доклад по теме «Методы активного управления очередями», г.Екатеринбург, 2019г.;

2) материалы XXI студенческой научно-практической конференции УрТИСИ СибГУТИ, I этап, «Активное управление очередями», г. Екатеринбург, 2019 г.

3) Материалы «Академия педагогических наук Новация» / «МЕТОДЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЯМИ» г.Екатеринбург, 2020 г.

По теме диссертации опубликовано 3 научные работы в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 44 наименований. Объем диссертации 82 страницы, включены также 29 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ публикаций по теме исследования» проведен обзор литературы, связанный с темой исследования.

Управление трафиком рассматривает в своей работе Кучерявый Е.А. В его книге излагаются, необходимые для требуемого качества обслуживания в различных приложениях и услугах сетей связи, механизмы, протоколы и алгоритмы.

Степанов С.Н. и Столяр С.Н. в своей диссертации разрабатывают алгоритмы оценки потребности в канальном ресурсе корпоративной мультисервисной сети связи.

В статье Гайдамака Ю.В. и Масленникова А.Г. было рассмотрено активное управление очередями и построена математическая модель данной системы передачи данных. В качестве функции управления был использован нечеткий регулятор.

Мультисервисные сети так же изучаются в работах Филимонова А.Ю., Денисовой Т.Б., Лихтциндер Б.Я., Назарова А.Н., Деарт В.Ю.

Среди работ зарубежных учёных, исследующих проблемы обработки трафика в очередях и оценки параметров качества обслуживания, следует отметить работы следующих авторов.

Jacobson V. в своей работе рассматривал предотвращение и контроль перегрузок. Так же в работах этого автора представлены случайное раннее обнаружение (RED) шлюзы для предотвращения перегрузки в сетях с коммутацией пакетов. RED шлюз не имеет предубеждений против интенсивного трафика и позволяет избежать глобальной синхронизации многих соединений, одновременно уменьшая их окно. Симуляторы сети TCP/IP используются для иллюстрации производительности RED шлюзов.

В работе Floyd S. изучается Adaptive RED и говорится о том, что RED алгоритм активного управления очередями позволяет операторам сети одновременно достигать высокой пропускной способности и низкой средней задержки. Тем не менее, в результате в среднем длина очереди довольно чувствительна к уровню загруженности и к настройкам параметров RED, и, следовательно, заранее не предсказуемо. Задержка является основным компонентом качества обслуживания клиентов, операторы сети, естественно, хотели бы получить приблизительную оценку средних задержек в своих перегруженных маршрутизаторах; достичь таких предсказуемых средних задержек с помощью RED. Для этого требуется постоянная настройка параметров для адаптации к текущим условиям движения. Авторы пришли к выводу, что пересмотренная версия Adaptive RED, которая может быть реализована как простое расширение в маршрутизаторах RED, устраняет чувствительность к параметрам, влияющим на производительность RED, и может надежно достичь заданной целевой средней длины очереди в самых разных сценариях движения.

Hollot C., Misra V. проводили жидкостный анализ сети маршрутизаторов AQM и рассматривали поддержку потоков TCP с применением RED. В этой статье используется уравнение стохастического дифференциала для моделирования взаимодействия набора потоков TCP и маршрутизаторов AQM в сетевом параметре. Объясняется роль RED параметров конфигурации на поведение алгоритма в сети. Указывается недостаток механизма усреднения RED, который является причиной проблем с настройкой RED.

В статьях Towsley D., Athuraliya S. изучаются ранее разработанная линеаризованная модель TCP и AQM. Используются классические методы системы управления для разработки контроллеров, которые хорошо подходят для применения. Показано, что контроллеры обладают лучшими теоретическими свойствами, чем хорошо известны контроллеры RED. Представляются рекомендации по разработке стабильных контроллеров с учетом параметров сети, таких как уровень нагрузки, задержка распространения и так далее. Также представляются простые методы реализации, которые требуют минимального изменения реализаций RED.

Feng W. считает, чтобы остановить рост потерь пакетов, вызванный экспоненциальным увеличением сетевого трафика, рассматривается возможность развертывания технологии активного управления очередями, такой как RED, современные методы неэффективны в предотвращении высоких уровней потерь. Неотъемлемая проблема этих алгоритмах управления очередью состоит в том, что они используют длины очереди в качестве индикатора серьезности перегрузки. В свете этого наблюдения предложен, реализован и оценен принципиально другой алгоритм управления активной очередью, называемый BLUE. Он использует события потери пакетов и простоя канала для управления перегрузкой.

Схемы маркировки на основе виртуальной очереди были предложены для AQM (Active Queue Management) в интернет-роутерах. Kunniyurs S. рассматривает конкретную схему, которую называется адаптивной виртуальной очередью (AVQ) и изучаются ее следующие свойства: устойчивость при наличии задержек обратной связи, ее способность поддерживать небольшую длину

очереди и ее надежность при наличии чрезвычайно коротких потоков, сравнивается его производительность путем моделирования с несколькими хорошо известными схемами AQM, такие как RED, REM, PI-контроллер и алгоритм неадаптивной виртуальной очереди.

Fengyuan R. изучает разработку нечеткого контроллера для активного управления очередью. В качестве эффективного механизма, действующего на промежуточных узлах для поддержки сквозного управления перегрузкой, активное управление очередью (AQM) принимает компромисс между использованием канала и задержкой, испытываемой пакетами данных. Способность FLC к переходному отклику и отслеживанию превосходит возможности контроллера PI, что полезно для достижения целей схемы AQM.

Chrysostomou C. рассматривает общую методологию управления активным управлением очередью (AQM) в сети TCP/IP, основанные на принципах управления нечеткой логикой. Простой, эффективный и действенный нелинейный закон управления строится с использованием лингвистической модели системы, а не традиционной математической модели, которая легко адаптируется в различных сетевых средах. Методология нечеткого управления обеспечивает присущую надежность и эффективный контроль системы в самых разных условиях эксплуатации без необходимости настройки каких-либо параметров.

Таким образом, представленные выше авторы провели исследование методов управления нагрузкой и пришли к выводу, что пассивное управление очередями имеет ряд проблем, поэтому преимущественно используется активное управление очередями RED, ARED, PI, REM, AVQ, FEM, FLC. Вместе с тем, использование активного управления в условиях передачи разнородного трафика в IP-сетях провайдеров не всегда даёт требуемые результаты.

Использование методов обработки трафика на основе нечёткой логики показывают их высокую эффективность во многих областях. Необходимо провести исследование метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов на основе нечёткой логики для предотвращения перегрузок и улучшения качества обслуживания в современных мультисервисных IP-сетях и проанализировать влияние регулятора нагрузки с нечеткой логикой на процесс обслуживания пакетов в очереди маршрутизатора.

Во второй главе «Анализ методов активного управления очередями» проведен анализ существующих методов обработки трафика в очередях и приведено сравнение их достоинств и недостатков.

Анализ различных методов обработки трафика в очередях был проведен в программном комплексе NS-2 (Network Simulator-2). Схема сети для имитационного моделирования приведена на рисунке 1. Через канал с ограниченной скоростью одновременно передавался трафик, имитирующий TCP приложения с длительными по времени соединения с помощью 100 сессий FTP, короткие TCP-соединения с помощью запросов HTTP интенсивностью 50 новых запросов в секунду и потоки данных UDP с постоянной скоростью.

Результаты имитационного моделирования перегрузки в сети со смешанным типом трафика в NS-2 для различных методов управления (Adaptive RED, AVQ, Tail Drop, FEM, FLC, PI, RED, REM) показали, что при использовании метода Tail

Для значительных потерь из-за переполнения буфера приходится на короткие HTTP-соединения, а при использовании активных методов управления TCP-соединения имеют незначительные потери.

В заключении первой главы обобщены основные результаты и сформулированы задачи исследования. Недостаточно интенсивный упреждающий сброс пакетов приводит к переполнению очереди и ещё большему одновременному сбросу всего трафика, и наоборот, чрезмерный упреждающий сброс – к опустошению очереди и к уменьшению коэффициента использования канала. Поэтому необходимо исследовать регулятор с нечёткой логикой для автоматической подстройки вероятности сброса или маркировки пакетов, оптимальной для стабилизации длины очереди около эталонного значения, что также позволит уменьшить джиттер. Для оценки эффективности работы регулятора необходимо построить математическую модель и рассчитать вероятностно-временные характеристики. Полученные аналитические данные для проверки адекватности далее сравниваются с результатами имитационного моделирования и результатами испытаний на реальном оборудовании.

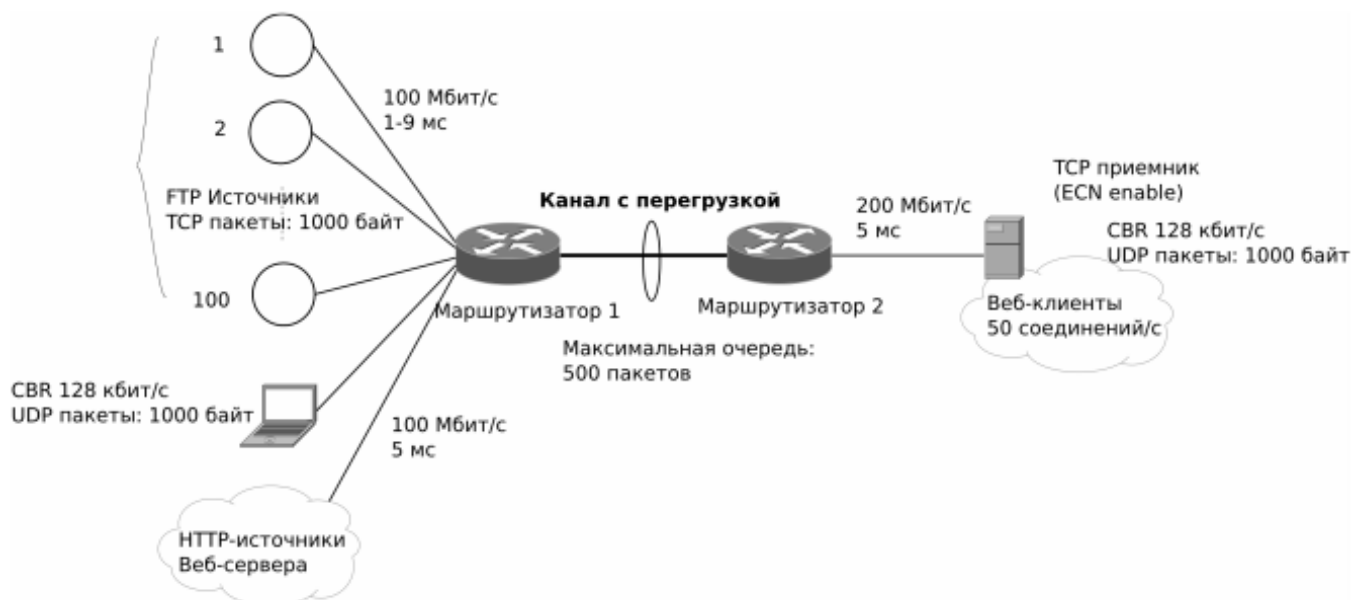


Рисунок 1 – Схема сети имитационного моделирования

В третьей главе «Исследование метода управления очередью на базе нечеткой логики» исследован метод обработки трафика в очереди маршрутизатора на основе нечёткой логики. Исследована функция управления, рассчитывающая приращения вероятности сброса пакетов в зависимости от текущей длины очереди и текущей степени нагрузки.

В разделе описаны принципы нечёткой логики, даны определения нечёткости, нечётким множествам и нечётким выводам. На основе нечёткой логики используется регулятор для управления очередью маршрутизатора для своевременной маркировки или удаления поступающих пакетов с целью предотвращения перегрузки и удержания длины очереди около заданного значения.

Регулятором (контроллером) FLC решения об изменении текущего значения вероятности сброса/маркировки P , поступившего пакета принимаются на основе значений двух входных переменных (рисунок 2).

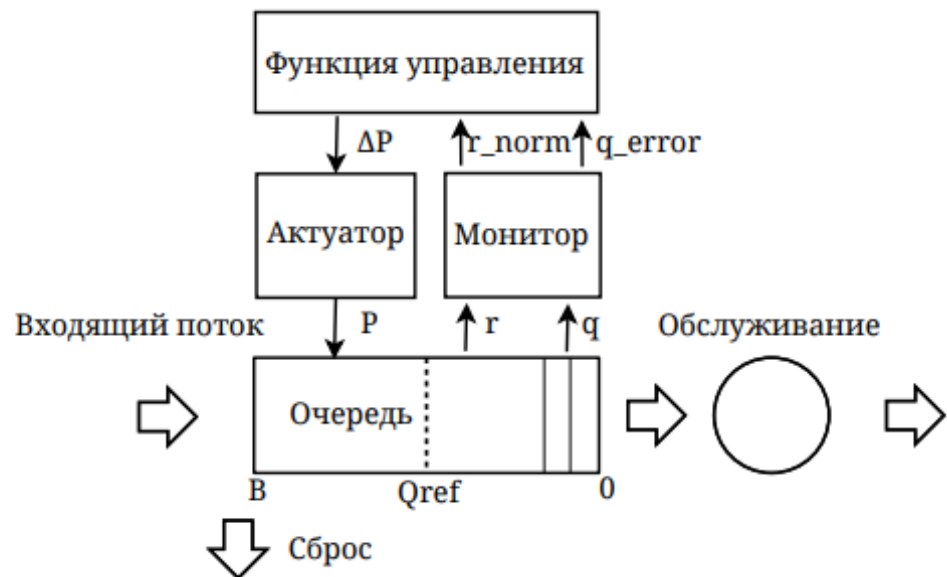


Рисунок 2 – Система передачи данных с активным управлением очередью

Первая переменная q_{error} – разница (текущая ошибка) между текущим q и заданным значением длины очереди Q_{ref} , а в качестве второй переменной было предложено использовать интенсивность трафика r (*rate*), то есть отношение количества полученных пакетов к максимально возможному переданному количеству за интервал измерения.

На вход модуля «Функция управления» модуль «Монитор» передаёт нормированное значение $q_{error}^{i_{norm}}$ отклонения длины очереди от эталонного значения и нормированное значение интенсивности поступления пакетов на интервале Δt_i .

Модуль «Функция управления» использует значение входных параметров $q_{error}^{i_{norm}}$ и r^i_{norm} для расчёта выходного параметра – приращения вероятности сброса пакета ΔP^i на следующем интервале наблюдения Δt^{i+1} , $i > 1$.

Регулятор для входных переменных вычисляет значения функции принадлежности μ_x , то есть степени уверенности в том, что входная переменная принадлежит к нечёткой (лингвистической) переменной. Нечёткий вывод делается путём операций над множествами на основе соответствующего набора правил, использующего экспертные оценки. Одним из широко распространённых алгоритмов нечёткого вывода является алгоритм Мамдани (Mamdani). Значение истинности предпосылки для каждого правила вычисляется с помощью операции *minimum*. Приведение к чёткости выполняется с помощью дискретного метода «центра тяжести».

Далее описана реализация регулятора с нечёткой логикой в виде программного модуля для сетевого симулятора NS-2. В ходе ряда экспериментов имитационного моделирования, опытным путём, были оптимизированы формы функций принадлежности и наборы правил нечёткого вывода. Модуль

«Монитор» проводил измерения с интервалом $\Delta t = 6$ мс. Максимальное изменение вероятности сброса P_{max} за время Δt было принято 8×10^{-5} . При данных параметрах регулятор с нечёткой логикой давал наименьшее средне-квадратичное отклонение (СКО) от эталонной длины очереди.

Коэффициент использования канала во всех экспериментах был близок к единице. Графики изменения вероятности сброса и длины очереди за время моделирования (для эксперимента при скорости в канале 50 Мбит/с и задержке 5 мс) приведены на рисунках 3 и 4 соответственно:

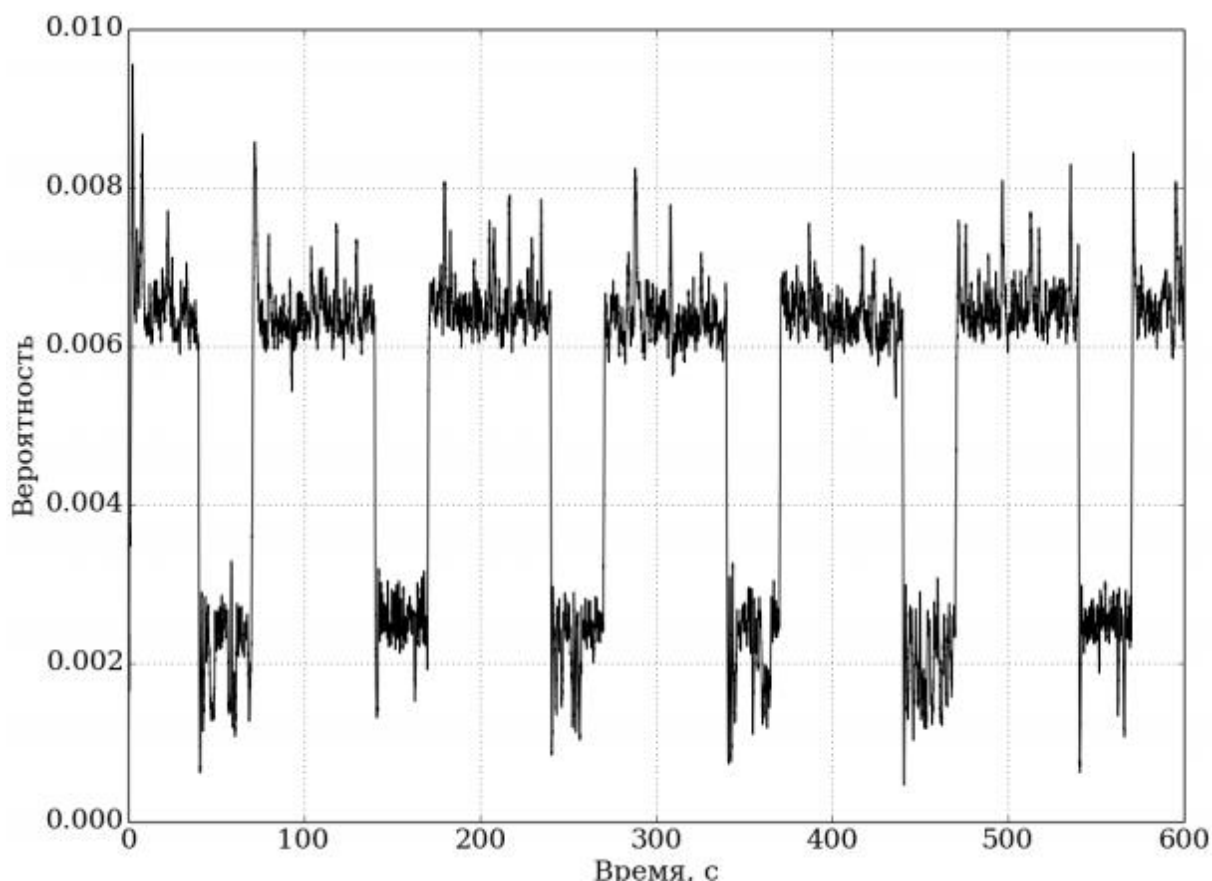


Рисунок 3 – Изменение вероятности сброса пакетов при обработке трафика регулятором с нечёткой логикой

Используемый метод FLC для обработки трафика в очереди в зависимости от интенсивности трафика автоматически подстраивает значения вероятности сброса пакетов для удержания текущей длины очереди около заданного значения – 300 пакетов. В данном эксперименте, в пяти последовательных интервалах по 100 секунд, среднее значение длины очереди составило 322 пакета с доверительным интервалом ± 1 пакет, а среднеквадратичное отклонение – 33 пакета с доверительным интервалом ± 1 пакет (достоверность 95%). По стабильности среднего значения длины очереди можно сделать вывод о стационарности процесса изменения длины очереди.

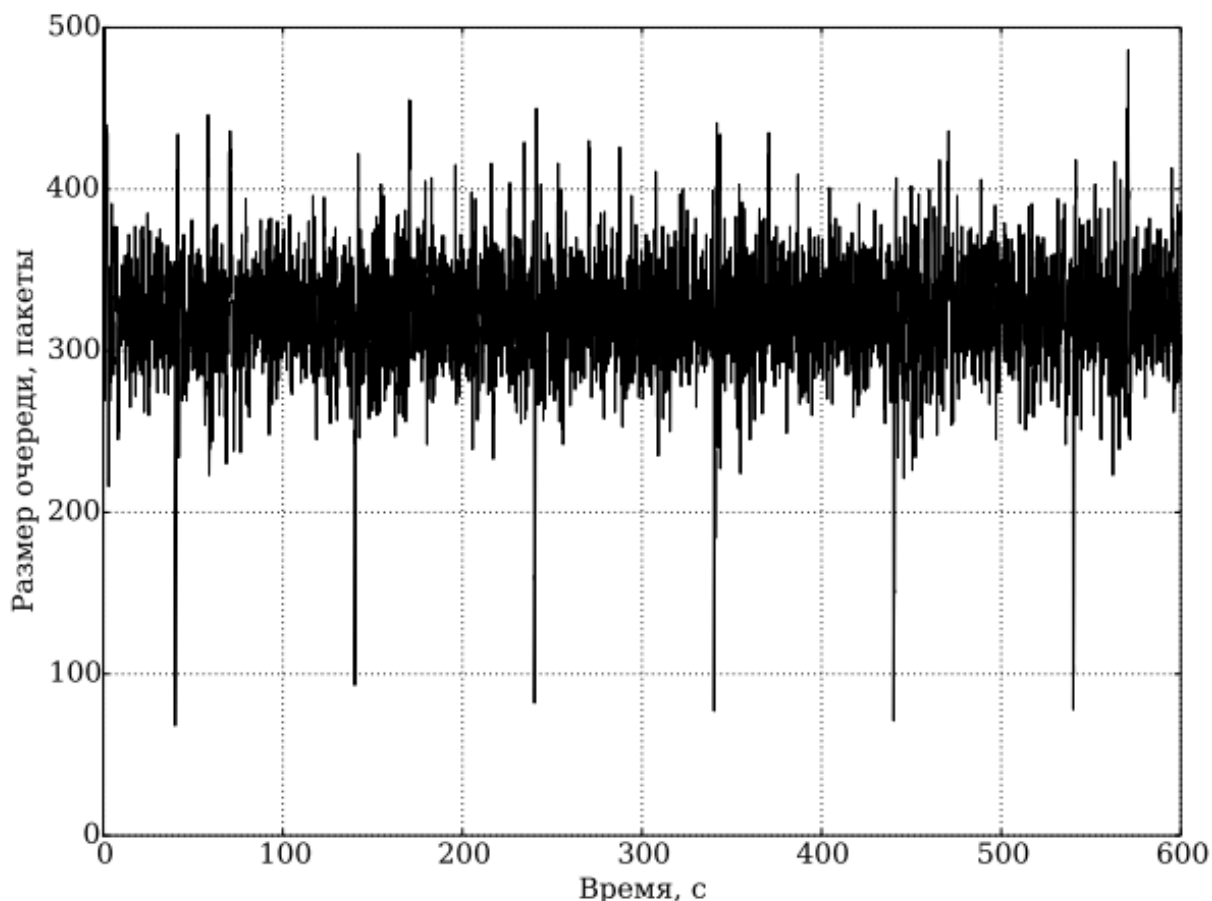


Рисунок 4 – Изменение длины очереди при обработке трафика регулятором с нечёткой логикой

По результатам исследования регулятора с нечёткой логикой на основе данных имитационного моделирования сделан вывод, что данная реализация метода способна эффективно удерживать длину очереди около эталонного значения при изменении интенсивности нагрузки.

Затем исследована работа метода обработки трафика в очереди на основе нечёткой логики FLC при различных характеристиках канала передачи данных. С помощью имитационного моделирования оценены такие параметры качества, как процент потерянных пакетов, коэффициент использования канала, средняя задержка передачи пакетов и вариация задержек при разных значениях пропускной способности и задержки передачи пакетов в канале передачи данных.

Для оценки параметров качества при работе метода обработки трафика в очередях в программном комплексе NS-2 исследовано моделирование фрагмента сети TCP/IP между двумя маршрутизаторами в момент перегрузки в канале.

При моделировании использована реализация New Reno протокола TCP с включённой функцией ECN (Explicit Congestion Notification – явное уведомление о перегрузке, RFC–3168), для сигнализации маршрутизатором транспортному уровню о возможной перегрузке в канале. В случае UDP трафика пакеты случайным образом сбрасывались в момент перегрузки.

Для определения зависимостей параметров работы предложенного метода обслуживания от параметров канала передачи данных проведён регрессионный

анализ, который показал, что при увеличении задержки в канале среднее значение длины очереди уменьшается. При этом среднеквадратичное отклонение (СКО) от среднего значения растёт по линейному закону.

В основном потери пакетов приходятся на неуправляемый трафик UDP. Потери пакетов при длительных TCP-соединениях минимальны и для FTP-трафика в худшем случае не превышали 0,2%, а в лучшем 0,03%, благодаря применению маркировки ECN. Значение вариации задержек UDP пакетов также уменьшается по квадратичному закону с ростом скорости в канале, что также показывает увеличение качества работы метода управления при сокращении времени обслуживания, при одинаковом количестве TCP-соединений.

Имитационное моделирование работы метода обслуживания FLC в программном комплексе NS-2 в широком диапазоне параметров канала, и анализ результатов показал следующие зависимости:

- стабильность длины очереди линейно возрастает с сокращением задержки в канале;

- процент потерянных пакетов и среднее значение вариации задержек пакетов уменьшаются с ростом полосы пропускания по квадратичному закону.

Метод обработки трафиком в очередях на основе нечёткой логики может эффективно удерживать длину очереди около заданного значения в условиях сложного трафика с нелинейной динамикой. Работа метода в сочетании с явным уведомлением о перегрузке позволяет минимизировать потери длительных TCP соединений.

В четвертой главе «Исследование математической модели процесса обслуживания пакетов в маршрутизаторе с управлениями на базе нечеткой логики» исследована математическая модель процесса обработки трафика в очереди в системе массового обслуживания с регулятором на основе нечёткой логики.

В разделе использована жидкостная модель TCP-потока, которая описывается с помощью системы дифференциальных уравнений (V.Misra,2000):

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{1}{R} - \frac{W(t) \times W(t-R)}{2R} \times P_{drop}(t-R) \\ \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{N}{R} \times W(t) \times (1 - P_{drop}(t)) - C \end{cases}, \quad (1)$$

где t - текущее время;

$W(t)$ - размер TCP окна;

$Q(t)$ - размер очереди;

R - задержка «туда-обратно» (RTT);

C - скорость в канале;

N – количество TCP сессий;

$P_{drop}(t)$ - вероятность сброса пакета.

Данная система решается численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка, причём на каждой итерации в систему подставляется значение вероятности

сброса пакета $P_{drop}(t)$ вычисленное регулятором с нечёткой логикой исследованным в предыдущей главе.

При достижении длины очереди значения равного заданному Q_{ref} , регулятор автоматически увеличивает вероятность сброса и стабилизирует длину очереди. Сравнение полученных результатов решения дифференциальных уравнений с результатами, полученными на имитационной модели, даёт возможность говорить об адекватности исследуемой жидкостной модели ТСР соединения при прохождении через маршрутизатор с активным управлением очередью.

Далее использована модель с гистерезисным пороговым управлением для вывода математической модели.

На систему с буферным накопителем ёмкостью B , нижним порогом L , верхним порогом H и эталонным значением длины очереди Q_{ref} поступает поток заявок с распределением Пуассона с интенсивностью $\lambda(s,q,r)$, зависящей от состояния системы. Заявки обслуживаются в порядке поступления по экспоненциальному закону с интенсивностью μ .

Проведем дискретизацию параметров функции управления очередью, введя параметр $r \in \{0,1,2,3,4\}$, характеризующий уровень интенсивности нагрузки на систему, и параметр $s \in \{0,1,2,3,4\}$ статуса перегрузки, который определяет уровень загрузки системы, то есть степень наполненности буфера. При этом состояниям с одинаковым уровнем интенсивности нагрузки r может соответствовать разный статус перегрузки s .

Для управления интенсивностью предложенной нагрузки в очереди системы введены два порога – нижний порог L и верхний порог H таким образом, что выполняется соотношение $L < Q_{ref} < H$.

Для системы массового обслуживания (СМО) исследованная диаграмма интенсивностей переходов.

Функционирование СМО описывается марковским процессом, для которого выведена система уравнения равновесия (СУР), и затем численно решена методом LU-разложения. Полученное распределение стационарных вероятностей позволило рассчитать вероятностно-временные характеристики системы. Сравнение рассчитанного среднего значения длины очереди при разной нагрузке с данными имитационного моделирования системы М/М/1/50 FLC при эталонном значении $Q_{ref}=25$ приведено на рисунке 5. Также для сравнения, на том же рисунке, приведена нагрузочная кривая модели М/М/1/50 Tail Drop (TD) рассчитанная по известной аналитической формуле.

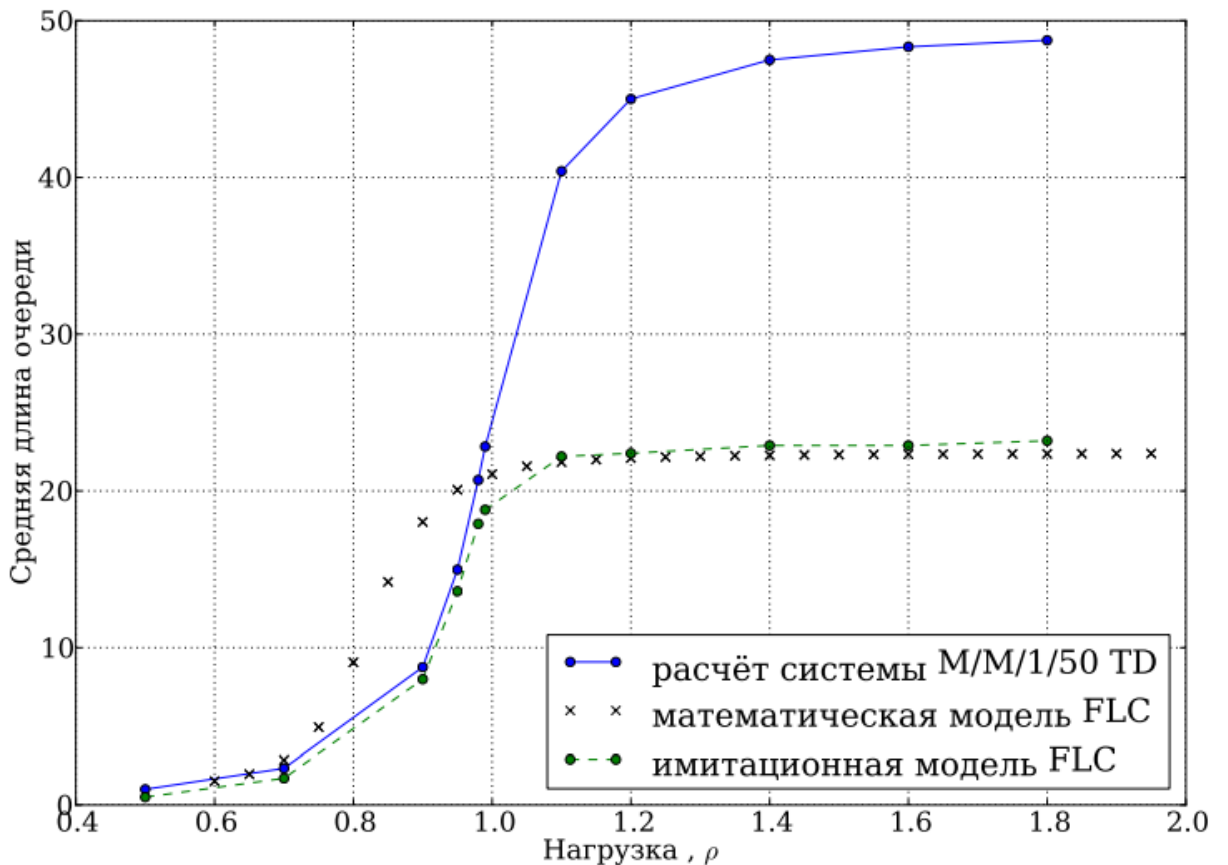


Рисунок 5 – Зависимость средней длины очереди от нагрузки

Рост средней длины очереди на имитационной модели при небольшой нагрузке $\rho < 1$ повторяет график модели M/M/1/n Tail Drop, а при переходе в режим перегрузки $\rho > 1$, также как и график математической модели, стремится к эталонному значению $Q_{ref}=25$.

Так же рассчитано влияние задержки на среднюю длину очереди по формуле:

$$\bar{N} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(n+1)\rho^{n+1}}{1-\rho^{n+1}} - R, \quad (2)$$

где ρ - нагрузка;

R - задержка.

На рисунке 6 показаны зависимости средней длины очереди от нагрузки математической модели FLC с учетом задержки и без нее. Задержку примем равной 10 мс. Из этого графика видно, что при наличии задержки средняя длина очереди уменьшается, что негативно скажется на сети, так как время на передачу трафика увеличится.

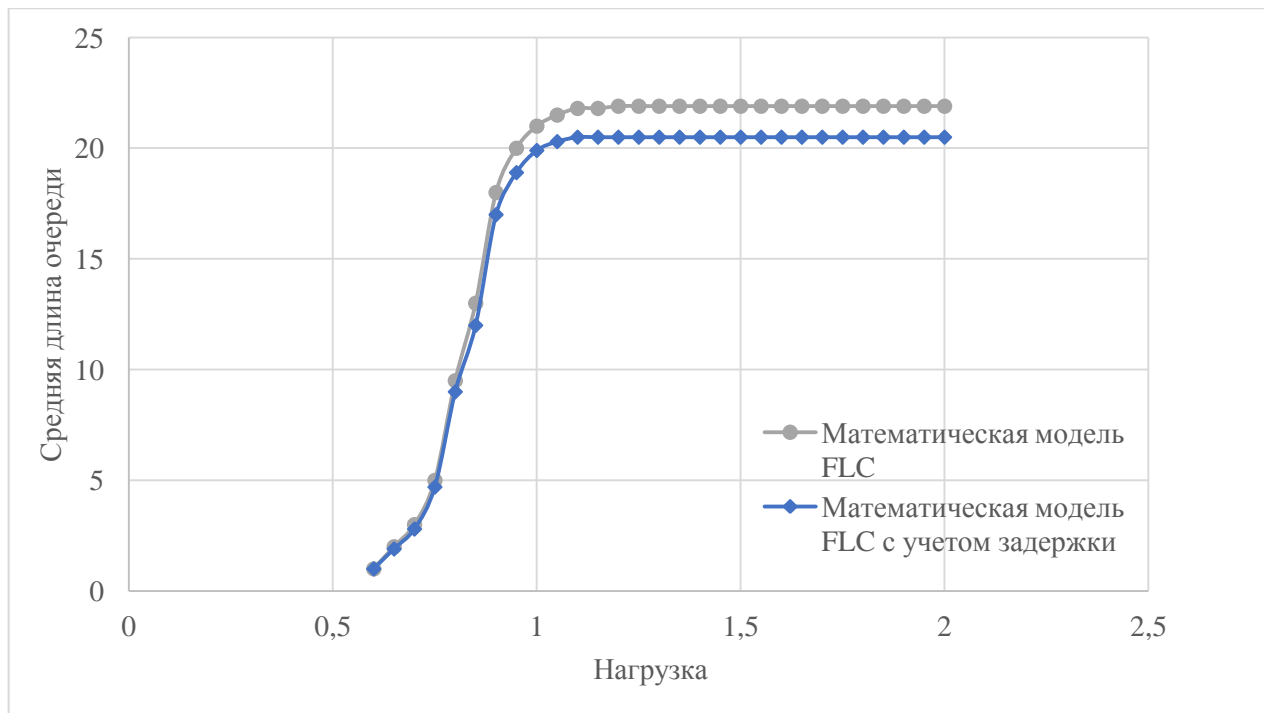


Рисунок 6 – Зависимости средней длины очереди от нагрузки математических моделей FLC

В заключении главы сделан вывод, что сравнение результатов численного анализа построенной жидкостной модели TCP потока с данными, полученными на имитационной модели NS-2, а также численный анализ математической модели на основе гистерезисного управления нагрузкой с данными, полученными на имитационной модели M/M/1/n, показывает адекватность математических моделей с активным управлением очередью регулятором с нечёткой логикой. Используемые математические модели дают возможность оценивать вероятностно-временные характеристики систем с регулятором на основе нечёткой логики. Сделан вывод о негативном влиянии задержки на среднюю длину очереди и на систему передачи данных в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью магистерской диссертации являлось исследование метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов мультисервисной сети на основе нечеткой логики. В ходе работы были выполнены поставленные задачи. Проведенный анализ существующих методов активного управления очередями маршрутизаторов для предотвращения перегрузок позволил определить степень проработанности вопроса.

В работе были проанализированы современные методы обработки трафика в очередях, такие как RED, Adaptive RED, PI, REM, AVQ, FLC, FEM для использования в маршрутизаторах мультисервисных сетей. С помощью имитационного моделирования показана их сравнительная эффективность. Доказано, что метод управления длиной очереди на основе нечёткой логики дает лучшие результаты, чем перечисленные известные методы.

Исследованная имитационная модель обработки пакетов в маршрутизаторах на базе NS-2 также показала высокую эффективность метода.

Основные результаты работы и выводы.

Построенная имитационная модель позволяет провести сравнительный анализ между различными методами обработки трафика в очереди маршрутизатора, такими как Tail Drop, RED, ARED, PI, REM, AVQ, FLC, при одинаковых условиях в режиме перегрузки и при сложной нелинейной динамике трафика в мультисервисной сети.

Результаты имитационного моделирования показали, что существующие методы обработки трафика в очередях допускают значительные колебания длины очереди и тем самым ухудшают показатели качества обслуживания, такие как средняя задержка передачи пакета в сети, джиттер, процент потерянных пакетов и коэффициент использования канала. Методы активного управления с использованием нечёткой логики более подходят для работы в условиях нелинейного, скачкообразного изменения интенсивности нагрузки.

Метод обработки трафика в очереди маршрутизатора на основе регулятора с нечёткой логикой (FLC) способен эффективно предотвращать перегрузку в мультисервисной сети и не допускает переполнения и опустошения очереди, а также обеспечивает стабилизацию длины очереди около заданного эталонного значения со среднеквадратичным отклонением 10% от среднего значения при перегрузке в сети.

При обработке TCP-трафика с помощью контроллера FLC совместно с методом явного уведомления о перегрузке ECN, потери пакетов для длительных TCP-соединениях составили менее 0,03% в режиме перегрузки в сети.

Процесс обработки трафика в очереди в маршрутизаторе на базе регулятора с нечёткой логикой впервые описан с помощью математической модели процесса обслуживания с гистерезисным управлением с порогами. Составлена и решена система уравнений равновесия (СУР) этого процесса. Получены выражения для вероятностно-временных характеристик.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях

1 Шарова У.А. «Цифровая экономика: взгляд студенчества» доклад по теме «Методы активного управления очередями» // Материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2019 г.

2 Шарова У.А. Активное управление очередями// Формирование профессиональных компетенций выпускников инфокоммуникационного вуза в соответствии с требованиями отраслевых стандартов и ФГОС 3++. – I этап – Екатеринбург, 2018;

3 Паламарчук У.А. Методы активного управления очередями // Академия педагогических идей «Новация». – 2020. – №3 (март).