

На правах рукописи



Масленников Андрей Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБРАБОТКИ ТРАФИКА В
ОЧЕРЕДЯХ МАРШРУТИЗАТОРОВ
МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ
НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ**

Специальность 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре «Сети связи и системы коммутации» Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский технический университет связи и информатики (ФГБОУ ВО МТУСИ).

Научный руководитель: **Деарт Владимир Юрьевич**
к.т.н., доцент

Официальные оппоненты: **Тарасов Вениамин Николаевич**
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Программного обеспечения и управления в технических системах» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ)

Абилов Альберт Винерович
к.т.н., доцент, декан Приборостроительного факультета Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова (ИжГТУ)

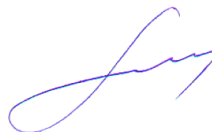
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС)

Защита диссертации состоится 26 февраля 2016 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ) по адресу: 443010, г. Самара, ул., Льва Толстого, д. 23, конференц-зал корпуса № 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУТИ и на сайте:
https://www.psuti.ru/science/dissertation_councils/announcements

Автореферат разослан « » января 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д219.003.02
д.т.н., проф.



Тяжев А.И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие технологий широкополосного доступа и рост популярности различных Интернет-услуг, таких как, Интернет-телевидение, OTT (Over-The-Top — передача видео через публичную сеть Интернет), видеоконференции, передача данных через файл-обменные сети P2P (peer-to-peer — одноранговые сети), доступ к социальным сетям, облачным хранилищам данных и облачным приложениям приводит к росту потребностей к доступной полосе пропускания и соответственно к постоянному наращиванию скоростей каналов передачи данных. Из-за всплесков трафика и несовершенства методов управления трафиком на сети возникают перегрузки, которые приводят к переполнению очередей маршрутизаторов и ухудшению качества обслуживания.

Изначально в маршрутизаторах пакеты данных, которые не могут быть переданы сразу, помещались в промежуточный буфер при переполнении которого, новые поступающие пакеты отбрасывались. Переполнение буфера происходит каждый раз при наступлении перегрузки в сети. Такой пассивный режим работы буфера называют Tail Drop (отбрасывание конца очереди). Для предотвращения перегрузок в очередях маршрутизатора используются активные методы управления на основе метода RED (Random Early Detection — раннее случайное обнаружение).

Метод отбрасывания конца очереди Tail Drop, а также метод RED не всегда справляются с управлением трафиком со сложной динамикой, высокой пачечностью и нелинейностью изменения нагрузки, что приводит к возникновению перегрузок, явлению «глобальной синхронизации» TCP потоков, когда все TCP-источники при переполнении буфера теряют пакеты и одновременно снижают нагрузку, а затем опять одновременно её повышают. В результате чего, моменты перегрузки сменяются моментами простоя, что ведёт к неэффективному использованию ресурсов и снижению качества обслуживания. При передаче смешанного трафика TCP одновременно с UDP, синхронизация TCP-соединений и перегрузки также приводят к деградации сопутствующего UDP-трафика. Эти явления ухудшают такие параметры качества обслуживания трафика, как эффективная скорость передачи данных, процент потерянных пакетов, задержки и вариации задержек.

В системах автоматического управления процессами со сложной нелинейной динамикой, в робототехнике нашли широкое применение регуляторы на основе нечёткой логики FLC (Fuzzy Logic Controller). Такие регуляторы широко применяются когда, описание поведения системы с помощью точных математических методов представляется достаточно сложным, но доступно простое качественное описание поведения системы. Поэтому задача разработки регулятора на основе нечёткой логики FLC для применения в

качестве активного метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов является актуальной.

Степень разработанности темы. Методы улучшения параметров качества обслуживания в сетях передачи данных активно исследуются и разрабатываются. Среди работ зарубежных учёных, исследующих проблемы обработки трафика в очередях и оценки параметров качества обслуживания, следует отметить работы следующих авторов: Jacobson V., Floyd S., Hollot C., Misra V., Towsley D., Feng W., Athuraliya S., Kunniyurs S., Fengyuan R., Chrysostomou C. В России этой проблеме посвящены работы Гайдамаки Ю.В., Ефимушкина В.А., Кучерявого Е.А., Печинкина В.А., Рослякова А.В., Самуйлова К.Е., Степанова С.Н., Цитовича И.И., Яновского Г.Г. и др. Однако замены традиционным методам обработки трафика Tail Drop и RED в маршрутизаторах, несмотря на их недостатки, не найдено.

Результаты исследования соответствуют пунктам 4 и 14 паспорта научной специальности 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Объектом исследования является механизм обработки трафика в очереди маршрутизатора доступа для предотвращения перегрузки в мульти-сервисной сети.

Предметом исследования являются зависимости параметров качества обслуживания от механизма обработки трафика в очередях маршрутизаторов.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является разработка нового механизма обработки трафика в очередях маршрутизаторов на основе регулятора с нечёткой логикой FLC для предотвращения перегрузок, контролирования средней задержки в очереди и улучшения параметров качества обслуживания при передаче данных по пакетной сети на основе протоколов TCP/IP.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) проведено исследование существующих методов активного управления очередями маршрутизаторов для предотвращения перегрузок;
- 2) разработан нечёткий регулятор, эффективно регулирующий заполнение очереди в зависимости от интенсивности нагрузки и заполненности буфера;
- 3) построена имитационная модель процесса обслуживания пакетов в очереди маршрутизатора и проведено сравнение параметров качества обслуживания трафика при использовании нечёткого регулятора с параметрами обслуживания, обеспечиваемыми другими методами управления в режиме перегрузки в сети;
- 4) построена математическая модель нечёткого регулятора трафика и рассчитаны вероятностно-временные характеристики модели;

- 5) проведено сравнение расчётных данных, полученных на математической модели, с данными имитационного моделирования, что позволило удостовериться в адекватности полученных результатов;
- 6) разработанный метод управления на базе регулятора с нечёткой логикой реализован в виде программного модуля для Linux-маршрутизатора, что позволило убедиться в его эффективности на практике.

Научная новизна:

1. Разработан новый метод обработки трафика в очередях маршрутизаторов на основе нечёткой логики с контролем уровня текущей длины очереди, контролем интенсивности нагрузки и аддитивным приращением вероятности сброса пакетов при сложной нелинейной динамике трафика, который позволяет удерживать длину очереди около заданного эталонного значения в режиме перегрузки маршрутизатора.
2. Разработана имитационная модель процесса обслуживания пакетов в очереди маршрутизатора с нечётким регулятором (FLC) в сетевом симуляторе NS-2. Имитационная модель позволила сравнить эффективность методов управления очередями и параметры качества в условиях перегрузки в мультисервисной сети.
3. Разработана математическая модель процесса обслуживания пакетов в очереди при использовании регулятора с нечёткой логикой на основе гистерезисного управления с порогами. Модель позволяет рассчитывать вероятностно-временные характеристики системы в зависимости от интенсивности поступающей нагрузки, путём численного решения системы уравнений равновесия (СУР), и тем самым оценивать среднюю задержку пакетов в очереди.

Теоретическая и практическая значимость. Построенная 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. Реализация разработанного метода обработки трафика в очередях маршрутизатора в виде программного модуля для Linux-маршрутизаторов открывает возможности внедрения нового метода в сетях передачи данных. 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, что подтверждается актами использования.

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

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается расчётами с использованием методов математической статистики и теории вероятности, сравнением аналитических результатов с данными, полученными при имитационном моделировании и измерениями, полученными на лабораторном фрагменте сети передачи данных с использованием Linux-маршрутизатора.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих 7 конференциях:

- 15-й международной конференции Conference of Open Innovations Association FRUCT (Finnish–Russian University of Cooperation in Telecommunications), (С.–Петербург), 2014г.;
- международной конференции DCCN–2013 «Распределённые компьютерные и коммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва);
- всероссийской конференции с международным участием «Информационно–телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (РУДН, Москва) в 2011, 2012 и 2013 годах;
- 6-й отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества» (МТУСИ, Москва), 2012 г.;
- 11-й международной конференции Conference of Open Innovations Association FRUCT (Finnish–Russian University of Cooperation in Telecommunications), (С.–Петербург), 2012г.;
- конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы», «Международный форум информатизации», МФИ–2011 (МТУСИ, Москва);
- XIX международной научно-технической конференции «Информационные Средства и Технологии», ИСТ–2011 (МЭИ, Москва).

Личный вклад. Все основные научные положения и выводы, составляющие содержание диссертации, разработаны соискателем самостоятельно.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 11 печатных изданиях, 2 из которых напечатаны в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, внесённых в перечень утверждённый ВАК.

Положения, выносимые на защиту:

1. Построена 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. Разработанный метод обработки трафика в очереди на основе регулятора с нечёткой логикой (FLC) предотвращает перегрузку и обеспечивает стабилизацию длины очереди около заданного значения.

3. Построена математическая модель процесса обработки трафика в очереди в маршрутизаторе на базе регулятора с нечёткой логикой с помощью модели с гистерезисным управлением с порогами. Получены выражения для вероятностно-временных характеристик.
4. При использовании метода обслуживания очереди на основе регулятора с нечёткой логикой параметры качества передачи данных превосходят характеристики, получаемые при использовании традиционных методов Tail Drop и RED.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 124 страницы, содержащих 45 рисунков и 21 таблицу. Список литературы содержит 102 наименования.

Содержание работы

В **введении** обоснован выбор и актуальность темы, сформулированы цели работы и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведён анализ существующих методов обработки трафика в очередях и приведено сравнение их достоинств и недостатков.

Анализ различных методов обработки трафика в очередях был поведён в программном комплексе NS-2 (Network Simulator-2). Схема сети для имитационного моделирования приведена на рис. 1. Через канал с ограниченной

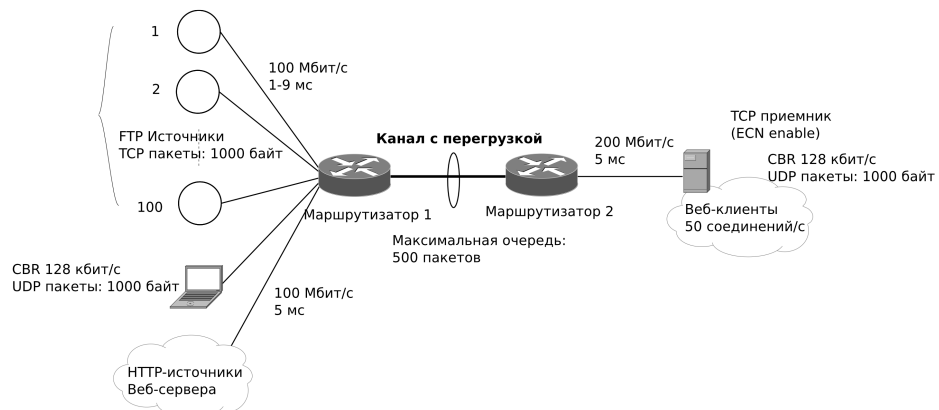


Рисунок 1 — Схема сети имитационного моделирования

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 Drop значительные потери 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 разработать 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.

Во второй главе разработан метод обработки трафика в очереди маршрутизатора на основе нечёткой логики. Построена функция управления, рассчитывающая приращения вероятности сброса пакетов в зависимости от текущей длины очереди и текущей степени загрузки.

В разделе 2.1 описаны принципы нечёткой логики, даны определения нечёткости, нечётким множествам и нечётким выводам. На основе нечёткой логики разработан 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 (рис. 2). 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*), т.е. отношение количества полученных пакетов к максимально возможному переданному количеству за интервал измерения.

На вход модуля «Функция управления» модуль «Монитор» передаёт нормированное значение $q_{errnorm}^i$ отклонения длины очереди от эталонного

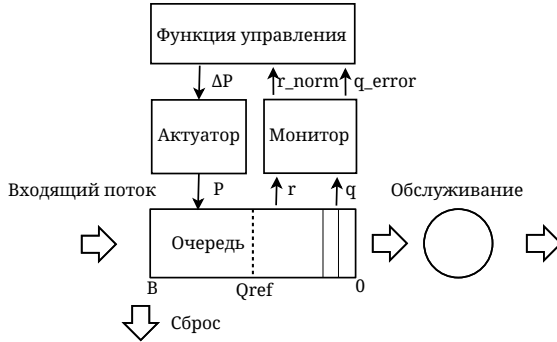


Рисунок 2 — Система передачи данных с активным управлением очередью

значения и нормированное значение интенсивности поступления пакетов на интервале Δt_i .

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

Регулятор для входных переменных вычисляет значения функции принадлежности μ_x , т.е. 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».

Рассчитанное с помощью функции управления значение приращения сброса пакета $\Delta P^i \in [-1, 1]$ используется модулем «Актуатор» для вычисления вероятности сброса пакета по формуле:

$$P^{i+1} = P^i + \Delta P^i \cdot P_{\text{max}}, \quad i \geq 1, \quad (1)$$

где $0 < P_{\text{max}} < 1$ максимальное значение приращения вероятности сброса на любом интервале наблюдения. Таким образом, на интервале Δt^i модуль «Актуатор» сбрасывает/маркирует пакеты с вероятностью P^i при поступлении пакета в исходящий буфер маршрутизатора.

В разделе 2.2 описана реализация разработанного 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 $8 \cdot 10^{-5}$. 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 рис. 3 и 4 соответственно:

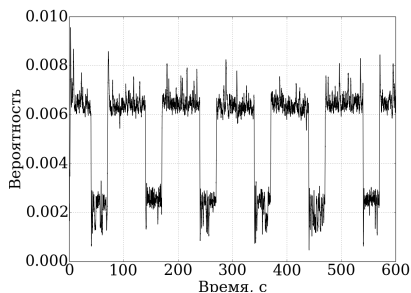


Рисунок 3 — Изменение вероятности сброса пакетов при обработке трафика регулятором с нечёткой логикой

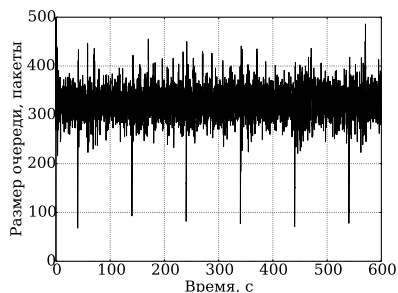


Рисунок 4 — Изменение длины очереди при обработке трафика регулятором с нечёткой логикой

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.

По результатам разработки 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.

В разделе 2.3 исследована работа разработанного метода обработки трафика в очереди на основе нечёткой логики FLC при различных характеристиках канала передачи данных. С помощью имитационного моделирова-

ния 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 проведено моделирование фрагмента сети TCP/IP между двумя маршрутизаторами в момент перегрузки в канале.

При моделировании использована реализация NewReno 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 разработанного 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 третьей главе построена математическая модель процесса обработки трафика в очереди в системе массового обслуживания с регулятором на основе нечёткой логики.

В разделе 3.1 использована жидкостная модель ТСП–потока, которая описывается с помощью системы дифференциальных уравнений (V.Misra, 2000):

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

где t — текущее время, $W(t)$ — размер ТСП окна, $Q(t)$ — размер очереди, R — задержка «туда-обратно» (RTT), C — скорость в канале, N — количество ТСП 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 разработанным 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 построенной жидкостной модели ТСП соединения при прохождении через маршрутизатор с активным управлением очередью.

В разделе 3.2 использована модель с гистерезисным пороговым управлением для построения 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, т.е. 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) построена диаграмма интенсивностей переходов.

Функционирование построенной 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 $M/M/1/50$ FLC при эталонном значении $Q_{ref} = 25$ приведено на рис. 5. Также для сравнения, на том же рисунке, приведена нагрузочная кривая модели $M/M/1/50$ Tail Drop (TD) рассчитанная по известной аналитической формуле.

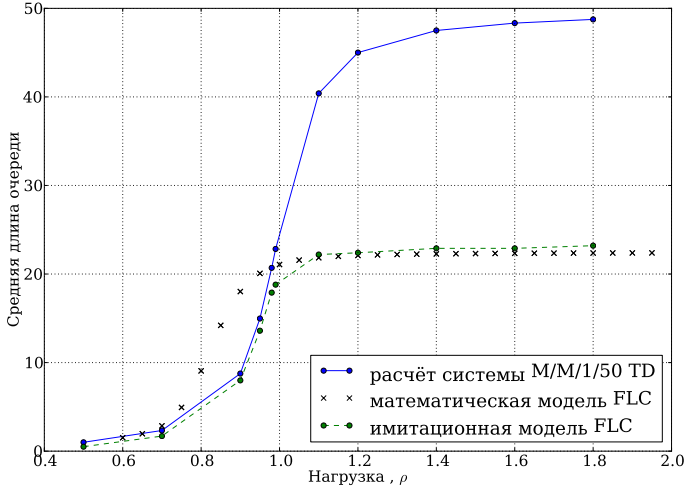


Рисунок 5 — Зависимость средней длины очереди от нагрузки

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 $Q_{ref} = 25$.

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 построенных математических моделей с активным управлением очередью регулятором с нечёткой логикой. Построенные математические модели дают возможность оценивать вероятностно–временные характеристики систем с регулятором на основе нечёткой логики.

В четвёртой главе разработанный метод обработки трафика в очередях FLC внедрён в маршрутизатор с открытым исходным кодом на базе операционной системы Linux. В главе описаны принципы управления трафиком и структура Linux-маршрутизатора. Метод обработки трафика FLC, реализованный в виде программного модуля ядра операционной системы, протестирован на виртуальной машине. Контроль длины очереди при различном количестве одновременных TCP соединениях показал, что метод FLC способен эффективно удерживать длину очереди около заданного значения вне зависимости от изменения входящей нагрузки. Сравнение значения джиттера для UDP трафика с постоянной скоростью при использовании методов FLC, RED и Tail Drop показало, что разработанный метод FLC обеспечивает меньшее значение джиттера.

Реализация метода FLC на аппаратном Linux-маршрутизаторе дала возможность проверить работу разработанного метода в лабораторной сети связи.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. 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.
2. 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.
3. Разработанный 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.
4. При обработке TCP-трафика с помощью разработанного 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.

5. 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.
6. Численное решение СУР построенной модели с гистерезисным управлением позволяет оценить среднюю длину очереди и среднеквадратичное отклонение в широком диапазоне коэффициента нагрузки, включая режим перегрузки ($\rho > 1$). Построенные математические модели адекватны системе обслуживания очереди с регулятором на основе нечёткой логики, что подтверждается сравнением с данными имитационного моделирования.
7. Использование метода обслуживания очереди на основе FLC в Linux-маршрутизаторе улучшает параметры качества передачи данных, такие как процент потери пакетов и джиттер, и в режиме перегрузки превосходит характеристики, получаемые при использовании традиционных в маршрутизаторах методов Tail Drop и RED в исследуемом диапазоне характеристик канала передачи данных представляющих практический интерес.

Список работ, опубликованных по материалам диссертации

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Гайдамака Ю.В., Масленников А.Г. Об одной системе массового обслуживания с активным управлением очередью // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2013. — №4. — С. 56–64.
2. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Исследование влияния параметров канала передачи данных на процедуры управления очередью // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт — 2012. — №7. — С. 77–81.

В других изданиях

3. Deart V., Maslennikov A., Gaidamaka Y. A Hysteretic Model of Queuing System with Fuzzy Logic Active Queue Management // Open Innovations Association FRUCT, Proceedings of 15th Conference. — St. Petersburg: IEEE, 2014. — P. 32–38.
4. Maslennikov A. Mathematical model of queue system with fuzzy logic controller // Proceedings of International Conference Distributed

- Computer and Communication Networks (DCCN): Control, Computation, Communications. — Moscow: Technosphaera, 2013. — P. 338–344.
5. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Жидкостная модель управления очередью маршрутизатора с нечёткой логикой // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием. — «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2013).* — М.: РУДН, 2013. — С. 89–91.
 6. Deart V., Maslennikov A. Fuzzy logic queue discipline processing over bottleneck link // *Proceedings of 11th Conference of Open Innovations Association Finnish-Russian University of Cooperation in Telecommunications (FRUCT-11).* — Saint-Petersburg: State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 2012. — P. 40–46.
 7. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Применение нечёткого регулятора для стабилизации длины очереди маршрутизатора // *Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. — «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2012).* — М.: РУДН, 2012. — С. 83–85.
 8. Масленников А.Г. Методы активного управления очередями маршрутизаторов // *Электронный журнал «Вычислительные сети. Теория и практика».* — 2011. — №2(19):4.2. — URL: <http://network-journal.mpei.ac.ru>.
 9. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Разработка метода управления очередью с помощью регулятора на нечёткой логике // *Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы».* — Международный форум информатизации (МФИ-2011). — М.: МАИ, 2011. — С. 21–22.
 10. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Анализ методов активного управления очередями // *Труды XIX Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии».* — Т. 1. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — С. 259–266.
 11. Деарт В.Ю., Масленников А.Г. Применение механизма с нечёткой логикой для управления очередями маршрутизаторов в сетях TCP/IP // *Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. — «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (ИТТММ-2011).* — М.: РУДН, 2011. — С. 102–105.