

## Отзыв

научного руководителя

на диссертационную работу Масленникова Андрея Геннадьевича на тему:

«Разработка метода обработки трафика в очередях маршрутизаторов мультисервисной сети на основе нечёткой логики», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографии и 2 приложений. Общий объём работы составляет 124 страницы, в том числе 45 рисунков и 21 таблицу. В библиографию включено 102 источника на русском и английском языках.

**Во введении** обоснована актуальность управления трафиком в IP-сетях и особенно активных методов управления очередями в маршрутизаторах, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные научные результаты, определена их практическая значимость и область применения, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** исследованы и проанализированы основные методы активного управления очередями (RED, PI, REM, FEM, FLC, AVQ, TailDrop). При помощи имитационного моделирования с использованием NS-2 проведено сравнение указанных методов, которое показало эффективность применения регулятора с нечеткой логикой FLC для управления очередями. В конце первой главы обобщаются полученные результаты и формулируются задачи дальнейшего исследования.

**Во второй главе** разрабатывается метод обработки трафика в очереди маршрутизатора на основе регулятора с нечеткой логикой. Построена функция управления, которая позволяет рассчитать приращения вероятности сброса пакетов в зависимости от текущего числа пакетов в очереди и текущего значения интенсивности нагрузки. Приведена программная реализация регулятора и на имитационной модели проведено исследование эффективности работы предложенного регулятора. Результаты имитационного моделирования показали, что применение регулятора обеспечивает стабильность заданной

длины очереди. Стабильность длины очереди линейно возрастает с сокращением задержек в канале, а процент потерянных пакетов уменьшается с ростом полосы пропускания по квадратичному закону.

**Третья глава** посвящена разработке математических моделей, адекватно описывающих процесс обработки пакетов в очереди маршрутизатора с учетом работы регулятора на нечеткой логике. Целью создания математических моделей является необходимость доказать эффективность данного метода управления очередями, особенно в условиях перегрузки. Для этого автор разработал две аналитические модели: жидкостную и гистерезисную. Жидкостная модель ТСП потока описывается системой дифференциальных уравнений, которая 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. 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.

Для построения второй математической модели использована модель с гистерезисным пороговым управлением. Обработка пакетов в маршрутизаторе представлена системой с буферным накопителем ёмкостью  $B$ , нижним порогом  $L$ , верхним порогом  $H$  и эталонным значением длины очереди  $Q_{ref}$ , на которую 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  $\mu$  и сбрасываются с вероятностью  $p$ , зависящей от интенсивности и текущего состояния системы. 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 позволило убедиться в адекватности аналитической модели. Использование полученной модели дает возможность оценки эффективности работы регулятора с нечеткой логикой.

**В четвертой главе** приведены результаты внедрения разработанного метода управления очередями FLC в маршрутизатор с открытым исходным кодом на базе операционной системы Linux. Описаны принципы управления трафиком и структура Linux-маршрутизатора. Метод управления FLC, реализованный в виде программного модуля ядра операционной системы, протестирован на виртуальной машине. Контроль длины очереди при различном количестве одновременных TCP соединений практически показал, что метод FLC способен эффективно удерживать длину очереди около заданного значения вне зависимости от изменения интенсивности 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. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в двух статьях в перечне рецензируемых изданий и еще в 9 печатных работах, изданных российскими и зарубежными издательствами.

Полученные результаты были апробированы и используются в компании ЗАО «ДАТАТЕЛ», а также в течении 2 лет уже используются в учебном процессе кафедры СС и СК МТУСИ, о чем имеются соответствующие акты.

Работа соответствует пунктам 4 и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Основные результаты диссертационной работы в период 2011 – 2014 гг. докладывались и обсуждались на 7 научно-технических конференциях и форумах, в том числе международных: международных конференциях

Conference of Open Innovations Association FRUCT (Finnish–Russian University of Cooperation in Telecommunications), 2012-2014г.; международной конференции DCCN–2013 «Распределённые компьютерные и коммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва); всероссийских конференциях с международным участием «Информационно–телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (РУДН, Москва) в 2011, 2012 и 2013 годах; отраслевых научных конференциях «Технологии информационного общества» (МТУСИ, Москва), 2012 г. и др.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В диссертации решена задача управления трафиком в очередях маршрутизаторов мультисервисной сети с применением регулятора с нечеткой логикой.

В процессе работы над диссертацией Масленников Андрей Геннадиевич проявил высокую компетентность в области современных телекоммуникационных технологий, незаурядную работоспособность и настойчивость в достижении поставленной цели, показал умение самостоятельно ставить и решать на высоком научном уровне задачи высокой сложности в области телекоммуникаций.

Диссертация Масленникова Андрея Геннадиевича удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной по специальности 05.12.13–Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Научный руководитель

к.т.н., доцент

В.Ю. Деарт

Подпись руки Деарта В.Ю., заверяю

Нач.отдела кадров МТУСИ

Алферова Н.В.