

На правах рукописи

Дмитриева Юлия Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТРАФИКА В МУЛЬТИКОНТРОЛЛЕРНЫХ СЕТЯХ SDN С УЧЁТОМ
МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ КАЧЕСТВА
ОБСЛУЖИВАНИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре инфокоммуникационных систем.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Елагин Василий Сергеевич

Официальные оппоненты:

Лаута Олег Сергеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», кафедра комплексного обеспечения информационной безопасности, профессор кафедры

Маркелов Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра радиотехнических систем, заведующий кафедрой

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится 9 сентября 2026 года в 15.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 7 июля 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Стремительный рост объёмов данных и ужесточение требований к качеству обслуживания (QoS), особенно для приложений реального времени (VoIP, онлайн-игры, промышленный Интернет вещей), на фоне перехода к программно-конфигурируемым сетям (SDN) выявляют новые задачи управления трафиком. Внедрение мультиконтроллерных архитектур SDN, необходимых для масштабируемости, требует совершенствования механизмов балансировки нагрузки, что делает тему актуальной.

Существующие методы балансировки фокусируются на отдельных параметрах качества, не обеспечивая комплексного учёта основных параметров QoS. Разнородность этих параметров создаёт методологическую проблему их совместного использования в едином алгоритме. Отсутствие эффективных механизмов нормализации и взвешивания параметров QoS является существенным научно-техническим пробелом.

Практическая потребность обусловлена необходимостью выполнения соглашений об уровне обслуживания. Анализ договоров операторов связи показывает дифференциацию требований QoS для классов трафика (Real Time, Best Effort), к которым современные алгоритмы не адаптированы, что ведёт к рискам невыполнения обязательств и финансовым потерям.

Таким образом, актуальна разработка новой методики балансировки трафика в мультиконтроллерных сетях SDN, интегрирующей многопараметрическую оценку параметров QoS и нормализацию разнородных показателей. Решение этой задачи позволит повысить эффективность сетевой инфраструктуры и создать задел для сетей 5G/6G, что подтверждает научную и практическую значимость исследования.

В диссертационной работе разрабатывается модель и методика распределения трафика в мультиконтроллерных сетях SDN, позволяющая за счёт нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки обеспечить улучшение показателей качества обслуживания по сравнению с традиционной нагрузочной балансировкой.

Степень разработанности темы. В настоящее время проблемам, связанным с анализом функционирования, управления качеством обслуживания в сетях SDN, посвящено значительное количество научных работ. Большое внимание уделяется вопросам, связанным с разработкой имитационных моделей ПКС. Существенный вклад в решение задач анализа, проектирования и развития ПКС внесли ученые отечественные ученые Кучерявый А.Е., Самуйлов К.Е., Киричек Р.В., Гольдштейн Б.С., Смелянский Р.Л., Гайдамака Ю.В., Кучерявый Е.А., Парамонов А.И., А.С.А. Мутханна, Волков А.Н., Бахарева Н.Ф., Владыко А.Г., Елагин В.С., Карташевский В.Г., Леохин Ю.Л., Перепелкин Д.А., Соколов Н.А., Степанов С.Н., Тарасов В.Н., Шалимов И.А., Шелухин О.И. Среди зарубежных следует отметить работы ученых Ian F. Akyildiz, Anderson T., Leland W.E., McKeown N., Min Luo, Norros I., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Salman O., Sherwood R., Tootoonchian A., Pu Wang, Willinger W, Zhao Y.

Работы отмеченных выше авторов внесли весомый вклад в исследования и управление качеством обслуживания в сетях.

Объект и предмет исследования диссертации. *Объектом исследования* является мультиконтроллерная программно-конфигурируемая сеть, а *предметом* —

сетевые характеристики и параметры распределения трафика в мультиконтроллерной программно-конфигурируемая сети.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертации является разработка модели и методики распределения трафика в мультиконтроллерной сети SDN с учетом нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки с целью улучшения показателей качества сервиса.

Цель диссертационной работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

- Анализ современных методов балансировки нагрузки в сетях SDN с акцентом на учёт параметров качества сервиса, включая обзор российских и зарубежных исследований, рекомендаций (ITU-T E.860, ITU-T Y.1541, 3GPP TS 23.501) и SLA российских операторов связи. Выявление недостатков существующих методов балансировки,

- Разработка модели балансировки нагрузки для мультиконтроллерных сетей SDN, учитывающую параметры QoS на уровне контроллеров (задержка обработки запроса, потерянные пакеты) и коммутаторов (круговая сетевая задержка, вариация сетевой задержки, потери пакетов);

- Разработка методики многокритериальной балансировки трафика на основе комбинированного параметра QoS, включая механизм нормализации разнородных параметров и систему весовых коэффициентов, адаптированных к классам обслуживания (Real Time, Best Effort);

- Апробация разработанной модели путём имитационного моделирования и сравнения эффективности балансировки по параметру нагрузки и на базе параметров QoS;

- Экспериментальная апробация методики с оценкой улучшения комбинированного параметра QoS, а также подтвердить возможность выполнения строгих требований QoS для чувствительных к качеству сервиса приложений.

Научная задача состоит в повышении эффективности балансировки трафика за счет разработки модели и методики распределения трафика в мультиконтроллерных сетях SDN на базе нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки.

Научная новизна полученных результатов исследования работы состоит в следующем:

- Благодаря предложенному методу комплексной оценки параметров QoS в сетях SDN, основанному на сведении разнородных параметров качества контроллеров и коммутаторов к единому интегральному показателю с использованием нормализующих весовых коэффициентов обеспечивается улучшение параметров QoS при балансировке в ПКС по сравнению с традиционными методами.

- Разработанная модель балансировки нагрузки в мультиконтроллерной архитектуре сети SDN позволяет за счёт нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки обеспечить улучшение показателей QoS по сравнению с традиционной нагрузочной балансировкой на 22,4 % на уровне контроллеров и на 47,9 % на уровне коммутаторов.

- Применение методики динамической балансировки трафика в сетях SDN с интеграцией комбинированного параметра QoS, обеспечивает распределение нагрузки и улучшает комбинированный показатель качества на 46,0 % по сравнению с традиционной нагрузочной балансировкой, что подтверждено с использованием

разработанного и зарегистрированного программного обеспечения имитационного моделирования.

Теоретическая значимость диссертации заключается в существенном развитии научного фундамента в области качества обслуживания в программно-конфигурируемых сетях и, в частности, в решении задачи многокритериальной балансировки нагрузки. Работа вносит вклад в теорию телетрафика и распределения сетевых ресурсов, предлагая новые концептуальные подходы и формальные модели, которые обобщают и расширяют существующие представления.

Важнейшим теоретическим результатом является разработка модели и методики распределения трафика в мультиконтроллерных сетях SDN, позволяющая за счёт нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки обеспечить минимизацию показателей QoS по сравнению с традиционной нагрузочной балансировкой. Модель преодолевает фрагментарность традиционных подходов, и устанавливает теоретические принципы оптимизации балансировки трафика SDN на основе разнородных параметров QoS. Тем самым закладывается теоретический базис для проектирования более сложных и эффективных мультиконтроллерных ПКС, способных адаптироваться к комплексным требованиям современных приложений.

Разработанная методика и её программная реализация формируют теоретико-экспериментальную платформу для дальнейших исследований. Позволяют верифицировать гипотезы, моделировать сложные сценарии и изучать поведение сетей в контролируемых условиях, тем самым способствуя развитию методов компьютерных экспериментов и имитационного моделирования в телекоммуникационной науке.

Практическая значимость диссертации заключается в повышении качества предоставления клиентских сервисов за счёт обоснованного выбора сетевых элементов для маршрутизации.

Диссертационное исследование заключается в создании законченного прикладного инструментария, позволяющего операторам связи, повысить эффективность использования сетевых ресурсов и обеспечить гарантированное качество обслуживания для абонентов. Полученные результаты доведены до уровня, пригодного для непосредственного внедрения в существующую и перспективную сетевую инфраструктуру.

Разработанная методика балансировки трафика на уровне управления в сети SDN может быть интегрирована в существующие контроллеры или использована как основа для создания собственных приложений сетевой оркестрации. Её применение позволяет операторам связи автоматизировать процесс управления трафиком и гарантировать соблюдение соглашений об уровне обслуживания для различных классов трафика.

Использование механизма нормализации и весовых коэффициентов параметров качества сервиса предоставляет простой и понятный инструмент для настройки приоритетов балансировки в зависимости от текущих бизнес-задач или заключаемых SLA-договоров, адаптируя поведение сети под конкретного заказчика или тип услуги.

Разработанная и зарегистрированная программа для ЭВМ «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» представляет собой готовый инструмент, который может использоваться проектными институтами и операторами связи для: планирования сетевой инфраструктуры; аудита и оптимизации существующих сетей; обучения персонала.

Таким образом, практическая значимость работы подтверждается созданием конкретных инженерных решений и программных продуктов, ориентированных на

решение актуальных задач операторов связи по обеспечению качества обслуживания в современных гетерогенных сетях на базе технологии SDN.

Методология и методы диссертационного исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, линейной алгебры.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод комплексной оценки параметров QoS в сетях SDN, основанный на сведении разнородных параметров QoS контроллеров и коммутаторов к единому интегральному показателю с использованием нормализующих весовых коэффициентов.

2. Модель балансировки нагрузки в мультиконтроллерной архитектуре сети SDN позволяет за счёт нормализации разнородных параметров QoS и их комбинированной оценки обеспечить улучшение показателей QoS по сравнению с традиционной нагрузочной балансировкой на 22,4 % на уровне контроллеров и на 47,9 % на уровне коммутаторов.

3. Методика динамической балансировки трафика в сетях SDN с интеграцией комбинированного параметра QoS, обеспечивает распределение нагрузки и улучшает комбинированный показатель качества на 46,0 % по сравнению с традиционными подходами, что подтверждено экспериментальными исследованиями на модельной сети.

Степень достоверности основных результатов подтверждена результатами аналитических расчётов и имитационного моделирования, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 24-25 февраля 2021), 11-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 15-16 февраля 2022), 12-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 28 февраля - 1 марта 2023), 13-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 27-28 февраля 2024), на семинарах кафедры инфокоммуникационных систем СПбГУТ.

Реализации и внедрение результатов работы. Полученные в ходе работы результаты внедрены в ООО «НТЦ АРГУС», ООО «Протей ТЛ», используются в СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при проведении практических занятий и лабораторных работ по курсам «Технологические принципы организации инфокоммуникационных услуг», «Исследовательские аспекты в программно-конфигурируемых сетях».

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации. Получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на промышленный образец.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены под руководством научного руководителя при непосредственном участии автора.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 125 страниц. Работа содержит 27 рисунков, 17 таблиц и список из 89 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая ценность результатов, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования.

В первой главе представлена архитектура сети SDN; рассмотрены подходы к качеству обслуживания. Проанализированы релевантные нашей задаче алгоритмы балансировки. Рассмотрены актуальные публикации российских и зарубежных авторов. В исследовании был проведен обзор научных работ на предмет различных алгоритмов по балансировке сетей SDN. Выполнено сравнение предлагаемых решений по трем критериям: производительность, качество обслуживания, эффективность системы. Исходя из сравнительного анализа алгоритмов балансировки сделан вывод, что балансировка трафика в сети SDN должна быть основана на лучшем алгоритме, позволяющему учитывать параметры QoS – Enhanced Weighted Round Robin (EWRR).

Во второй главе рассмотрена структура мультиконтроллерной сети SDN. Полагаем, что имеется несколько SDN коммутаторов, образующих сеть, обслуживающую трафик, как показано на рисунке 1.

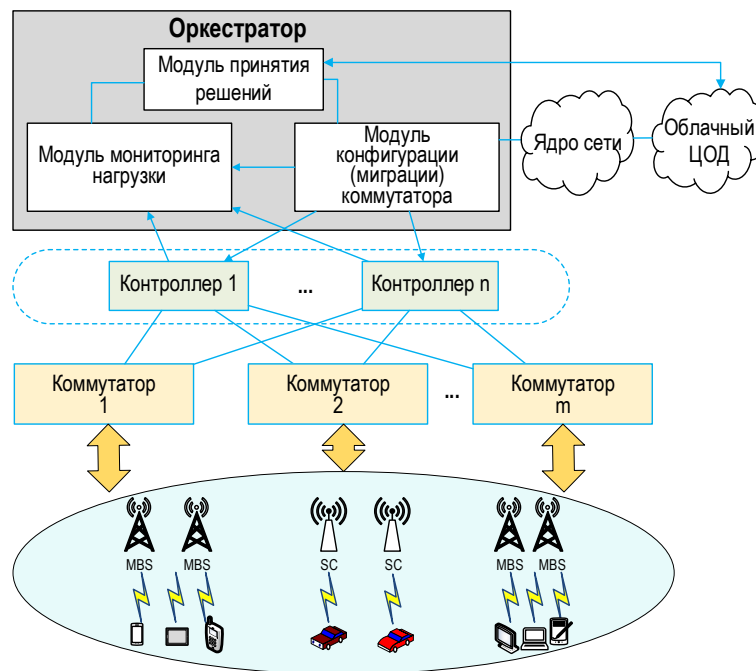


Рисунок 1 — Архитектура сети SDN

Для балансировки нагрузки рассмотрим модель распределения нагрузки на уровне контроллеров и коммутаторов.

Рассмотрены протоколы взаимодействия южного, северного и восточно-западного интерфейсов; эталонный стандарт ПКС – протокол OpenFlow.

Для балансировки нагрузки рассмотрена модель распределения нагрузки на уровне контроллеров и коммутаторов.

Проанализировано множество параметров QoS, применяемых для балансировки нагрузки контроллеров в сети SDN. При балансировке наиболее часто используемыми параметрами QoS являются: задержка обработки d ; потерянные пакеты t .

Разработан метод вычисления комбинированного параметра QoS контроллера. Выполнен поэтапно расчет нормализованной суммы параметров QoS для контроллера. Сумма нормализованных значений выглядит так:

$$Y_{C_QoS} = Y_d + Y_t, \quad (1)$$

где Y_d – нормализованный «вес» значения задержки d ,

Y_t – нормализованный «вес» значения потерянных пакетов t .

Для нормализации необходимо привести значения в разных единицах измерения к одному единому виду, который позволит сравнивать их между собой и использовать для расчёта.

- 1) Введем ограничения U для параметров задержка d и потерянные пакеты t :
 d от 1 до U_d мс,
 t от 0 до U_t %.
- 2) Произведем нормализацию, т.е. приведем к единому виду параметры, имеющие разные единицы измерения:
 d разделим на U_d ;
 t разделим на U_t .
- 3) Получим комбинированный параметр QoS контроллера, выполнив действия 1-3 для (1):

$$Y_{C_QoS} = \frac{d}{U_d} \times C_1 + \frac{t}{U_t} \times C_2,$$

где C_1, C_2 – нормализующий коэффициент соответствующего параметра.

Проанализированы параметры QoS, применяемых для балансировки нагрузки коммутаторов в сети SDN из рекомендаций ITU G114, ITU-T Y.1540, ITU-T Y.1541 и реальных примеров договоров операторов связи. При балансировке коммутаторов наиболее часто используемыми параметрами QoS являются: потерянные пакеты, круговая сетевая задержка, вариация круговой сетевой задержки.

Разработан метод вычисления комбинированного параметра QoS коммутатора. Произведем поэтапно расчет нормализованной суммы параметров QoS для коммутатора. Сумма нормализованных значений будет выглядеть следующим образом:

$$Y_{S_QoS} = Y_{lp} + Y_{pn} + Y_{jt}, \quad (2),$$

где Y_{lp} – нормализованный «вес» значения потерянные пакеты lp ,

Y_{pn} – нормализованный «вес» значения круговая сетевая задержка pn ,

Y_{jt} – нормализованный «вес» значения вариация круговой сетевой задержки jt .

Для нормализации необходимо привести значения в разных единицах измерения к одному единому виду, который позволит сравнивать их между собой или использовать для расчёта, для это введем пределы параметров U_{lp} , U_{pn} и U_{jt} и выполним следующие действия:

- 1) Введем ограничения для параметров потери пакетов lp , круговая сетевая задержка pn , вариация круговой сетевой задержки jt .

lp от 0 до U_{lp} %;
 pn от 1 до U_{pn} мс;
 jt от 0.. U_{jt} мс.

2) Произведём нормализацию, т.е. приведем к единому виду параметры, имеющие разные единицы измерения: lp разделим на U_{lp} ; pn разделим на U_{pn} ; jt разделим на U_{jt} .

3) Получим комбинированный параметр QoS коммутатора, выполнив действия 1-3 для (2):

$$w_{S_QoS} = \frac{lp}{U_{lp}} \times C_1 + \frac{pn}{U_{pn}} \times C_2 + \frac{jt}{U_{jt}} \times C_3,$$

где C_1, C_2, C_3 – нормализующий коэффициент соответствующего параметра.

В третьей главе разработана модель балансировки нагрузки в мультиконтроллерной сети SDN с учетом параметров QoS.

Для информационного взаимодействия между контроллерами и коммутаторами, информацию о нагрузке собирает и хранит оркестратор.

Разработана математическая модель с использованием двух контроллеров и десяти коммутаторов.

Пользователи генерируют потоки данных, каждый поток данных пользователей создает нагрузку на контроллер Y_c и коммутатор Y_s . Примем:

- максимальная нагрузка на контроллер равна 50 % (всего 2 контроллера), итого $2 \times 50 \% = 100 \%$;
- максимальная нагрузку коммутаторов равна 10 % (всего 10 коммутаторов), итого $10 \times 10 \% = 100 \%$;
- условно максимальная нагрузка, генерируемая абонентами равна 80 %. от максимально возможной.

Запросы с весом W генерируются с нагрузкой задаваемой случайным образом от 0,01 % до 0,09 %. Макс $Y = <80 \%$.

Для учета параметров QoS контроллеров задаем случайным образом параметры QoS для контроллеров. Заданы ограничения для параметров d, t . Итого в каждом запросе будет 2 варианта параметров для контроллеров:

1. Нагрузка контроллера Y_1, Y_2 , в диапазоне от 0,01 % до 0,09 %.
2. Параметры QoS d_1, d_2 – параметр задержка обработки запросов, мс. В диапазоне от 1 мс до 10 мс.
3. Параметры QoS t_1, t_2 – параметр потерянных пакетов, %. В диапазоне от 0 до 0,1 %.

Для учета параметров QoS коммутаторов задаем случайным образом параметры QoS. Итого в каждом запросе будет 10 вариантов параметров для коммутаторов.

1. Загрузка коммутатора Y_s , в диапазоне от 0,01 % до 0,09 %;
- Параметры QoS из технического задания договора оператора связи Билайн:
2. Потери пакетов lp в диапазоне от 0 до 0,1 %;
 3. Круговая сетевая задержка pn в диапазоне от 1 мс до 80 мс;
 4. Вариация сетевой задержки jt в диапазоне от 0 мс до 20 мс.

Выполнена апробация модели балансировки по параметру нагрузки. Распределяем нагрузку на контроллеры и коммутаторы, не учитывая параметры QoS,

используя алгоритм EWRR. Нормализованные параметры QoS суммируем для каждого запроса потока данных

По результатам обработки 100 000 случайно сгенерированных запросов и балансировки нагрузки с использованием алгоритма EWRR на коммутаторы и контроллеры по параметру нагрузки получили значения.

Проверена достоверность математической модели балансировки на базе параметров QoS.

На первом этапе распределяем нагрузку на контроллерах по параметрам QoS, используя алгоритм EWRR. Оркестратор направляет запрос на контроллер с наименьшим комбинированным параметром QoS. В данном случае будет действовать ограничение $Y_C \leq 50\%$.

Чтобы решить, на какой контроллер перенаправить запрос, оркестратору SDN необходимо сравнить значения комбинированного параметра QoS для каждого контроллера. Для этого необходимо сформировать из собранных параметров матрицу $A(3)$ с a_{ij} , где i - порядковый номер параметра ($i=1, \dots, 3$).

Определяем нормализующий коэффициент C_{ij} для каждого параметра равный 0,5, так как задержка в обслуживании и потери пакетов одинаково критичны для качества сервисов.

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 C_{ij} = 1$$

Элемент a_{ij} в матрице A умножается на нормализующий коэффициент C_{ij} .

$$A = \begin{pmatrix} C_{11}a_{w_1} & C_{21}a_{w_2} \\ C_{12}a_{d_1} & C_{22}a_{d_2} \\ C_{13}a_{t_1} & C_{23}a_{t_2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для каждого параметра находим один контроллер с одинаковым, минимальным значением и присваиваем ему значение в соответствии с формулой:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & a_{ij} = \min_{j=1, \dots, 2} (a_{ij}) \\ 0, & a_{ij} > \min_{j=1, \dots, 2} (a_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

Применяя формулу 4, получаем матрицу $B(5)$ с элементами b_{ij} , представляющими значения, которые присваиваются контроллерам для каждого параметра:

$$B = \|b_{ij}\|_{(3 \times 2)} \quad (5)$$

Строка матрицы B содержит один или несколько элементов b_{ij} , значение которых отлично от нуля. Задача состоит в том, чтобы найти контроллер с наименьшим комбинированным параметром QoS в определенный момент времени.

Руководствуясь алгоритмом распределения нагрузки определяем, что контроллер с наименьшим комбинированным параметром QoS - это контроллер на который распределяется нагрузка. Поэтому необходимо вычислить значение средневзвешенной оценки для каждого контроллера по формуле:

$$S_j = \sum_{i=1}^3 b_{ij}, j=1, 2 \quad (6)$$

Применяя формулу (6), получаем вектор: $S_j = [S_1, S_2]$. Необходимо провести минимизацию, найдя элемент S_j (индекс контроллера).

Направляя запрос на контроллер с минимальной комбинированной оценкой получаем максимальные параметры качества QoS для данного запроса.

Далее приступаем ко второму этапу распределению нагрузки на коммутаторах на базе параметров QoS, используя алгоритм EWRR. Оркестратор направляет запрос на коммутатор с наименьшим комбинированным параметром QoS. В данном случае будет действовать ограничение максимальное $Y_s \leq 10\%$. Нормализованные параметры QoS суммируем для каждого запроса контроллера для нашей модели.

Чтобы решить, на какой коммутатор перенаправить запрос, оркестратору SDN необходимо сравнить значения комбинированного параметра QoS для каждого коммутатора. Для этого необходимо сформировать из собранных параметров матрицу E (7) с e_{hf} , где h - порядковый номер параметра ($h=1, \dots, 4$), f - номер коммутатора.

Параметр нагрузки Y_s не нормализуется в расчётах, так как имеет только два состояния: коммутатор не загружен на 100%, то коэффициент $D_{1f}=1$, если коммутатор перегружен, то коэффициент $D_{1f}=0$ (коммутатор не может участвовать в балансировке нагрузки данного запроса).

$$\sum_{f=1}^{10} \sum_{h=1}^4 D_{hf} = 1$$

В математической модели для трафика Real Time зададим нормализующий коэффициент D_{hf} для каждого параметра QoS: $D_{2f}=0,33$, $D_{3f}=0,34$, $D_{4f}=0,33$ и нагрузки $D_{1f} [0,1]$ и в общем случае может быть изменено для корректировки влияния параметров,

$$D_{1f} = \begin{cases} 0, & \text{коммутатор перегружен} \\ 1, & \text{коммутатор не загружен} \end{cases}$$

$$E = \begin{pmatrix} D_{11}e_{w_1} & D_{21}e_{w_2} & \dots & D_{10,1}e_{w_{10}} \\ D_{12}e_{lp_1} & D_{22}e_{lp_2} & \dots & D_{10,2}e_{lp_{10}} \\ D_{13}e_{pn_1} & D_{23}e_{pn_2} & \dots & D_{10,3}e_{pn_{10}} \\ D_{14}e_{jt_1} & D_{24}e_{jt_2} & \dots & D_{10,4}e_{jt_{10}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Для каждого параметра необходимо найти один коммутатор или несколько с одинаковым (запрос распределяется на первый по счету), минимальным значением и присвоить ему значение в соответствии с формулой:

$$z_{hf} = \begin{cases} 1, & e_{hf} = \min_{f=1, \dots, 10} (e_{hf}) \\ 0, & e_{hf} > \min_{f=1, \dots, 10} (e_{hf}) \end{cases} \quad (8)$$

Применяя формулу 8, мы получаем матрицу Z (9) с элементами z_{hf} , представляющими значения, которые присваиваются коммутаторам для каждого параметра:

$$Z = \|z_{hf}\|_{(4*10)} \quad (9)$$

Строка матрицы Z содержит один или несколько элементов z_{hf} , значение которых отлично от нуля. Задача состоит в том, чтобы найти коммутатор с наименьшим комбинированным параметром QoS в определенный момент времени.

Руководствуясь алгоритмом распределения нагрузки определяем, что коммутатор с наименьшим значением комбинированного параметра QoS - это коммутатор на который распределяется нагрузка. Поэтому необходимо вычислить значение комбинированного параметра QoS для каждого коммутатора по формуле:

$$G_f = \sum_{h=2}^4 z_{hf}, h=2, \dots, 4, \quad (10)$$

где $f=1, \dots, 10$.

Применяя формулу (10), получаем вектор: $G_f = [G_1, G_2, \dots, G_{10}]$. Необходимо провести поиск среди параметров и вычислить коммутатор с минимальным индексом, найдя элемент G_f (индекс коммутатора), получаем целевой коммутатор с минимальным комбинированным параметром QoS.

По результатам обработки 100 000 случайно сгенерированных запросов и балансировки нагрузки на коммутаторы и контроллеры, используя алгоритм EWRR на базе параметров QoS получили значения.

С использованием математической модели произведены расчёты, осуществлена балансировка трафика. Отобразим результаты балансировки трафика по средневзвешенному комбинированному параметру QoS для контроллеров на рисунке 2.

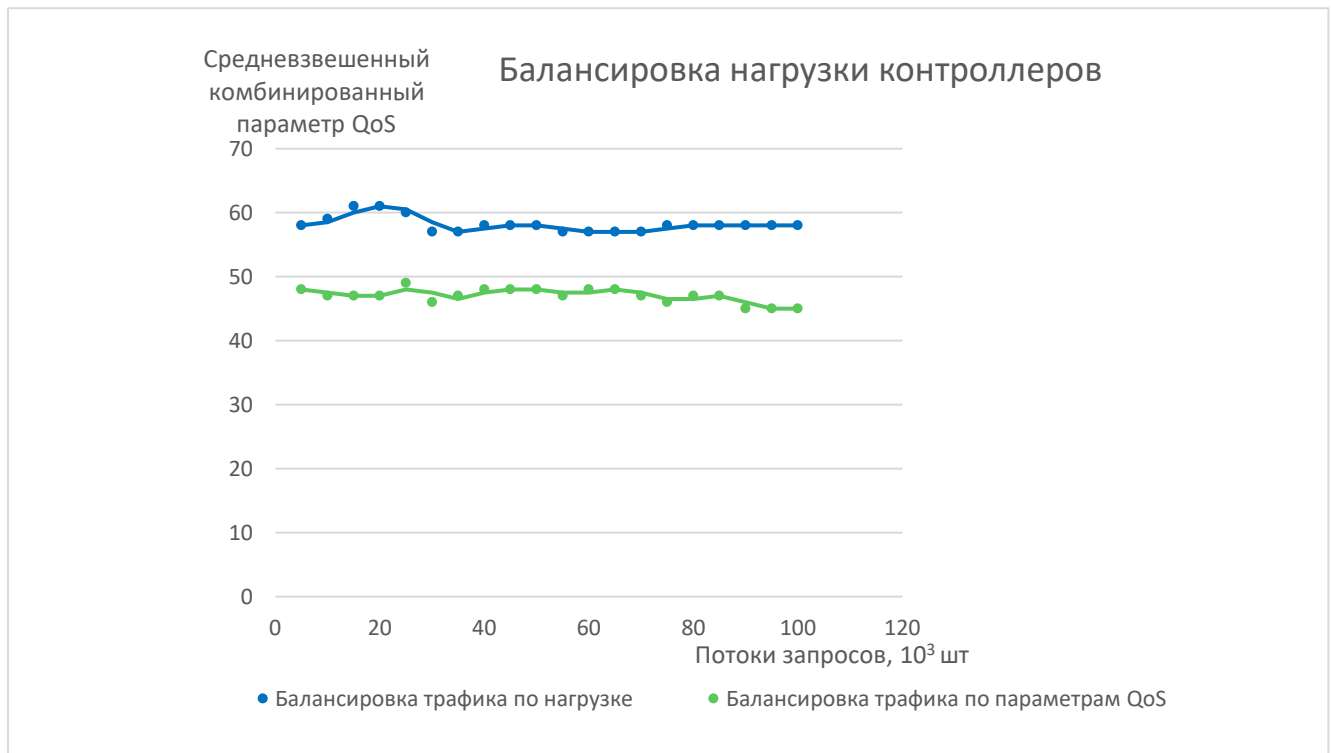


Рисунок 2 — Балансировка нагрузки контроллеров

График балансировки трафика контроллеров по нагрузке представлен на рисунке 2 изображен синим цветом. Значение средневзвешенного комбинированного параметра QoS при балансировке по нагрузке равно 58.

График балансировки трафика контроллеров по средневзвешенному комбинированному параметру QoS на рисунке 2 изображен зеленым цветом и равен 45. Значение средневзвешенного комбинированного параметра QoS уменьшилось при балансировке трафика по параметрам QoS на 22,4 %.

Отобразим результаты балансировки трафика по средневзвешенному комбинированному параметру QoS для коммутаторов на рисунке 3.

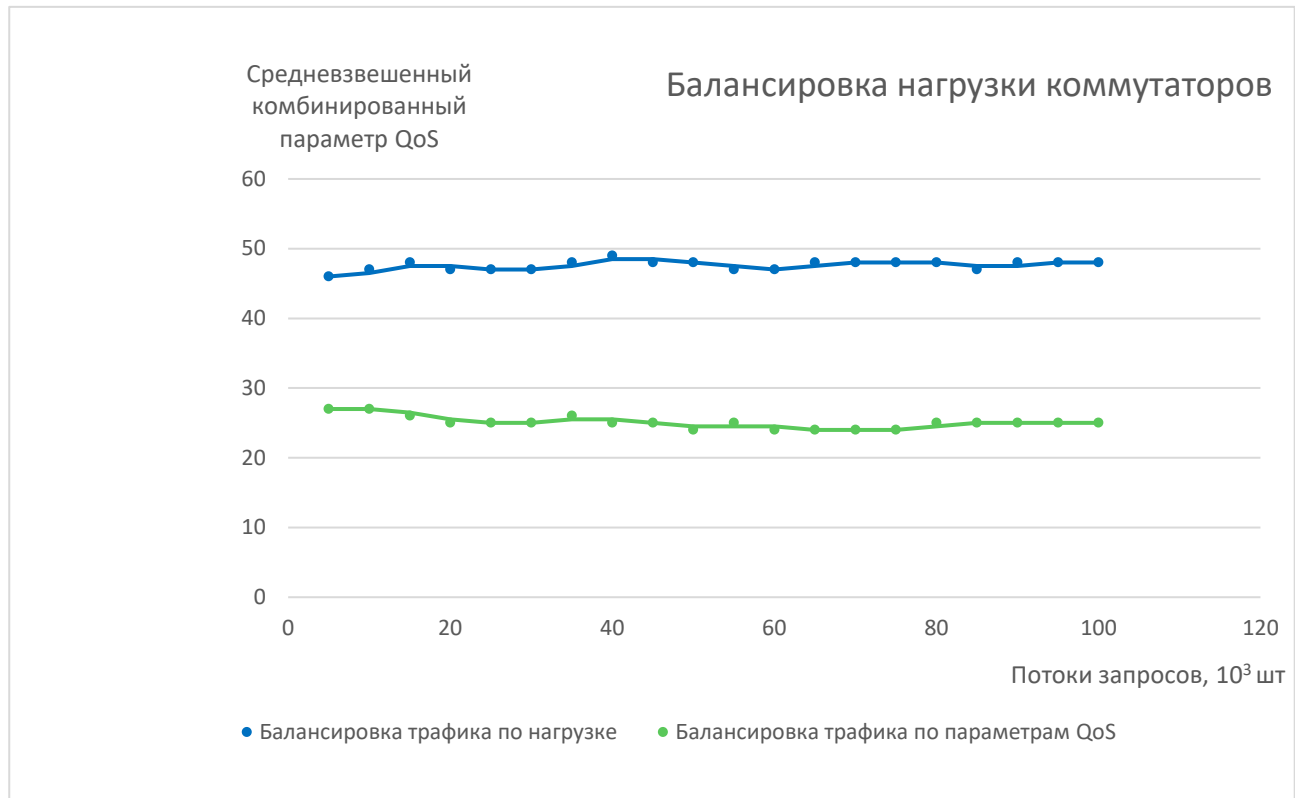


Рисунок 3 — Балансировка нагрузки коммутаторов

График балансировки трафика коммутаторов по нагрузке представлен на рисунке 3 изображен синим цветом. Значение средневзвешенного комбинированного параметра QoS при балансировке по нагрузке равно 48.

График балансировки трафика коммутаторов по комбинированному параметру QoS на рисунке 3 изображен зеленым цветом и равен 25. Значение средневзвешенного комбинированного параметра QoS уменьшилось при балансировке трафика по параметрам QoS на 47,9 %.

В четвертой главе разработана методика многокритериальной балансировки трафика в SDN.

Методика динамического перераспределения нагрузки функционирует по принципу непрерывного циклического процесса, который можно представить, как последовательность этапов: мониторинг, анализ, принятие решения, выполнение действия, мониторинг. Рассмотрим этапы методики балансировки трафика коммутаторов используя алгоритм EWRR (рисунок 4, где X – максимальный порог нагрузки на коммутатор).



Рисунок 4 — Методика балансировки трафика коммутаторов по комбинированному параметру QoS

Для проверки алгоритма балансировки нагрузки по комбинированному параметру QoS произведена апробация методики — создана программа для ЭВМ под названием «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования».

В верхней части меню «Setup» части меню расположены кнопки команд для управления экспериментом (рисунок 5).

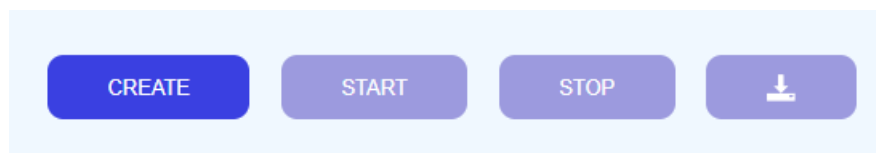


Рисунок 5 — Панель команд для контроля над экспериментом

Балансировка нагрузки на коммутаторах по параметрам QoS включается при помощи флага. При активном флаге предоставляется возможность управлять параметрами контроля по QoS в части меню «QoS settings» (рисунок 6).

QoS settings ☒

Agents loss boundary value: 0.5

0.1 1

Ping boundary value, ms: 100

100 10000

Jitter boundary value, ms: 20

10 200

Chart Settings ☐

Рисунок 6 — Параметры QoS эксперимент

Проведен эксперимент с помощью программы «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» для проверки алгоритма.

Зададим параметры имитационного моделирования в программе: Эксперимент проводится на 10 коммутаторах.

1. Диапазоны значений параметров QoS:

- L1, L2, L3..... L10 – параметр потери пакетов (Loss) в диапазоне от 0 до 0,1 %;
- P1, P2, P3..... P10 – параметр круговая сетевая задержка (Ping) в диапазоне от 1 до 100 мс;
- J1, J2, J3..... J10 – параметр вариация сетевой задержки (Jitter) в диапазоне от 0 до 20 мс.

2. Максимальная нагрузка коммутаторов 70 %.

С указанными параметрами провели эксперимент.

Графическое изображение эксперимента представлено на рисунке 7. Отображаются два графика: нагрузка на моделируемый коммутатор и очередь на обслуживание. Область обновляется в реальном времени, интервал обновления задаётся в панели управления.

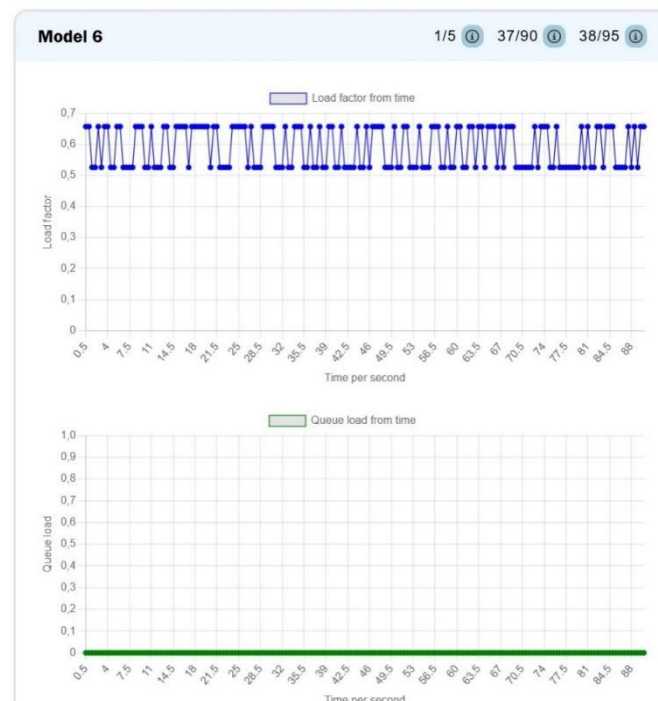


Рисунок 7 — Графическое изображение эксперимента на примере модели 6

На модель 6 представленную на скриншоте (рисунок 7) с начала эксперимента равномерно распределяется трафик, очередь из агентов (запросов) отсутствует. Параметры нагрузки на модель 6 соответствуют заданным значениям эксперимента и не выходят за пределы обозначенной максимальной нагрузки 0,7.

По результатам работы программы для ЭВМ получены данные о двух экспериментах по балансировке нагрузки между коммутаторами. Один эксперимент с учетом нагрузки, а второй на базе параметров QoS. Создается файл с результатами статистических данных эксперимента с названием ModelsParametersStatistic.exsx. На основании этих данных построены графики (рисунок 8).

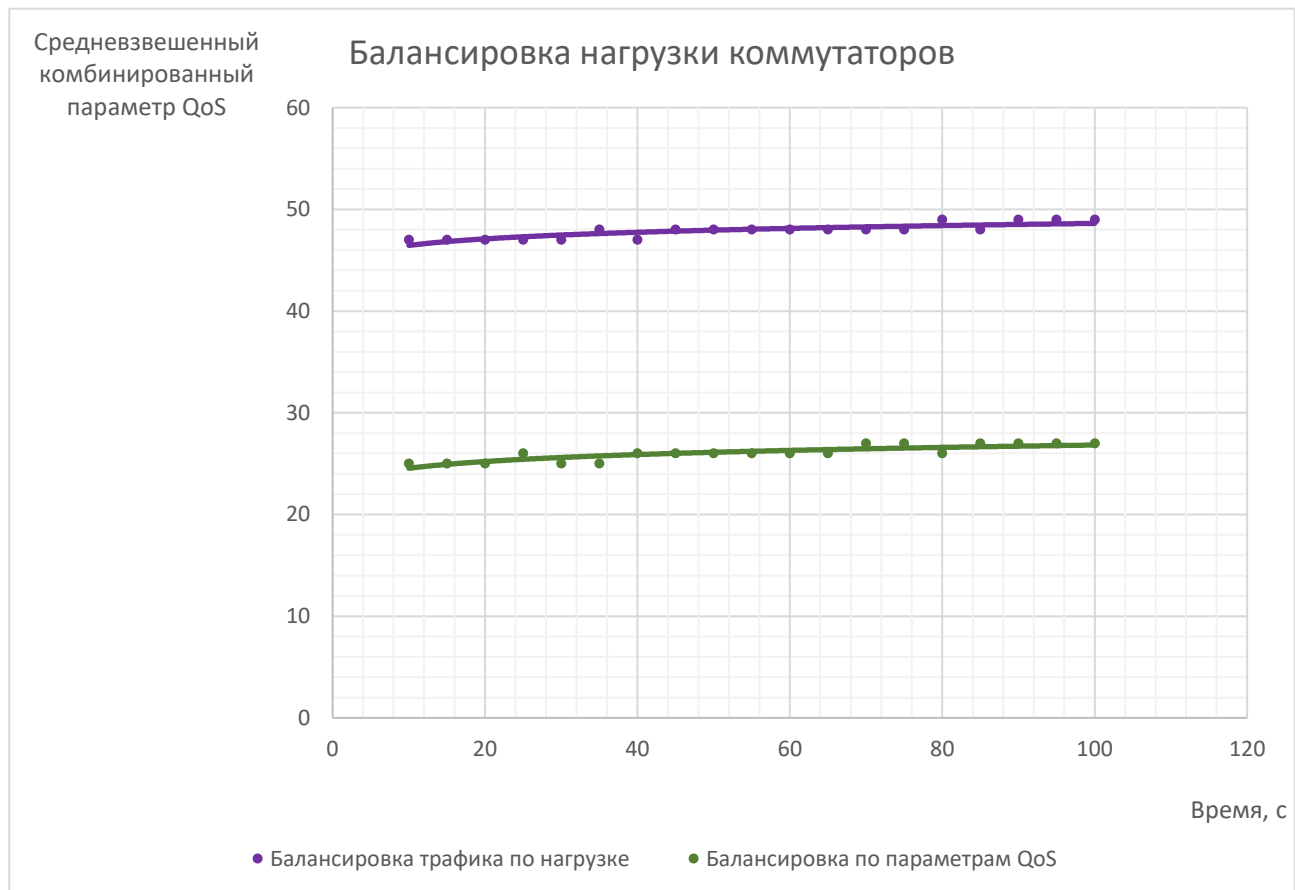


Рисунок 8 — Балансировка нагрузки коммутаторов

Предложенная методика обеспечила улучшение комбинированного показателя QoS на 46 % по сравнению с методом балансировки, учитывающим только нагрузку на узлы сети. Это подтверждает эффективность интеграции параметров QoS (потери пакетов, круговой сетевой задержки, вариации сетевой задержки) при балансировке трафика в сетях SDN.

На рисунке 9 представлены результаты расчетного и экспериментального методов балансировки по нагрузке и по параметрам QoS.

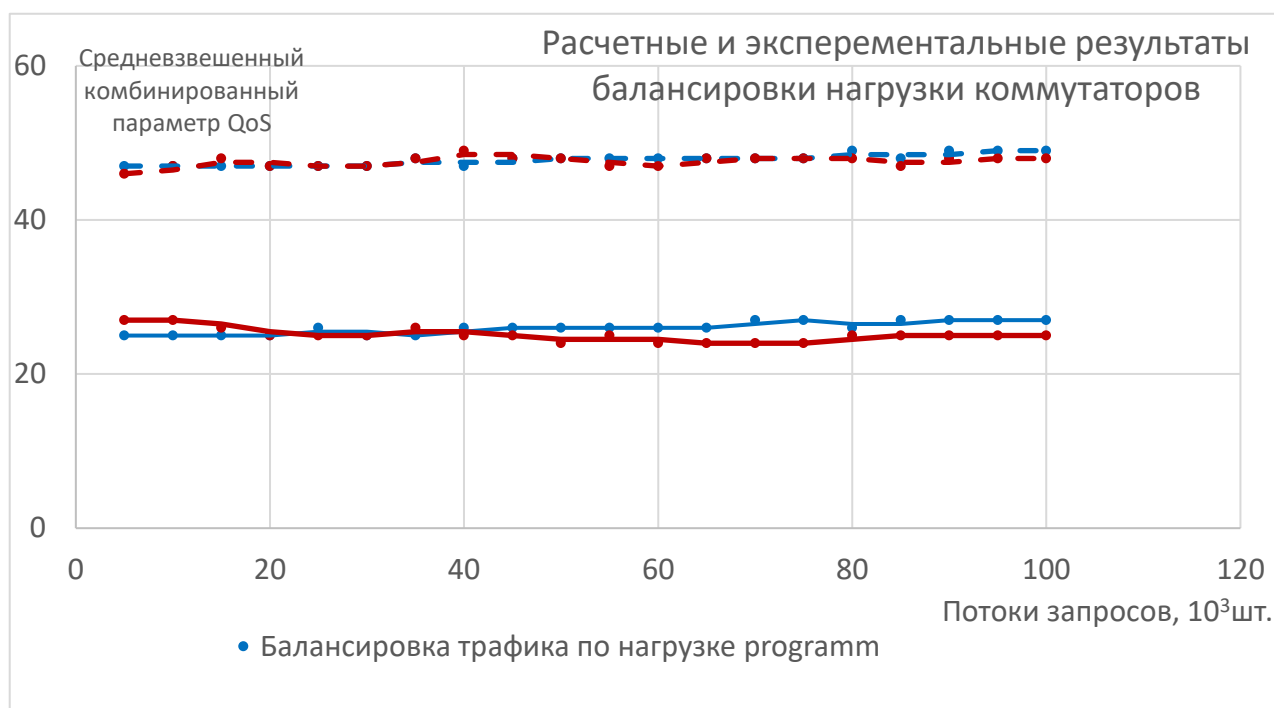


Рисунок 9 — Результаты расчетного и экспериментального методов балансировки по нагрузке и по параметрам QoS

Результаты балансировки нагрузки коммутаторов аналитической и расчетной модели имеют расхождение: при балансировке по нагрузке 2 %, а по параметрам QoS 8 %.

В заключении диссертации перечислены основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований в диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Исследована научная литература в области изучения и анализа трафика и методов балансировки нагрузки в SDN, выявлены их недостатки: отсутствие многопараметрического подхода к QoS, игнорирование нормализации разнородных параметров и требований SLA для разных классов трафика.
2. Обоснован выбор алгоритма EWRR как базового для построения новой методики, показавшего наилучшие результаты по критериям производительности, возможности учета разнородных параметров QoS адаптирующийся к различным классам сервиса.
3. Разработана модель балансировки нагрузки для мультиконтроллерной SDN, учитывающая параметры QoS как на уровне контроллеров (задержка обработки, потерянные пакеты), так и на уровне коммутаторов (потери пакетов, круговая сетевая задержка, вариация сетевой задержки), решающая проблему сопоставления разнородных метрик QoS через систему весовых коэффициентов. Обоснован выбор весовых коэффициентов для разных типов трафика на основе анализа рекомендаций QoS (ITU-T E.860, ITU-T Y.1541, 3GPP TS 23.501) и QoS крупных российских операторов связи.

4. Разработана модель многокритериальной балансировки трафика на основе комбинированного параметра QoS, включающая: механизм нормализации разнородных параметров QoS; алгоритм вычисления взвешенной оценки состояния сетевых элементов; процедуру динамического перераспределения трафика с учётом класса обслуживания (Real Time, Best Effort).

Получены расчетные значения показателей QoS в рамках разработанной модели сети: на уровне контроллеров: улучшение комбинированного параметра QoS на 22,4 % по сравнению с балансировкой только по нагрузке; на уровне коммутаторов: улучшение комбинированного параметра QoS на 47,9 %.

5. Для апробации методики многокритериальной балансировки трафика на основе комбинированного параметра QoS разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» (свидетельство № 2025662025 от 16.05.2025). Получены результаты, схожие с расчетными: улучшение общего показателя QoS на 46,0 % в сравнении с традиционными методами балансировки, распределяющими трафик на основе только параметра нагрузки элементов сети.

6. В диссертации решена актуальная научная задача создания эффективного механизма балансировки нагрузки в SDN с гарантированным качеством обслуживания. Результаты работы могут быть использованы: операторами связи для гарантированного выполнения требований QoS и повышения качества услуг; разработчиками SDN-решений для создания интеллектуальных систем управления трафиком; при проектировании сетей 5G/6G, промышленного IoT и облачных платформ, требующих высоких стандартов QoS.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Дмитриева Ю.С. Моделирование сетевого ресурса в программно-конфигурируемых сетях / Ю.С. Дмитриева, В.С. Елагин // Вестник связи. – 2020. – № 6. – С. 35-40.
2. Дмитриева Ю.С. Сравнительный анализ методов управления сетевыми ресурсами в сетях SDN // Труды учебных заведений связи. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 73-83.
3. Дмитриева Ю.С. Управление сетевыми ресурсами на основе намерений // Вестник связи. – 2022. – № 4. – С. 20-26.
4. Дмитриева Ю.С. Анализ методов идентификации трафика для управления ресурсами в SDN / Ю.С. Дмитриева, Д.В. Окунева, В.С. Елагин // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9. – № 6. – С. 42-57.
5. Дмитриева Ю.С. Мультиконтроллерная модель системы балансировки нагрузки при миграции виртуальных систем в SDN // Вестник связи. – 2024. – № 7. – С. 16-24.
6. Дмитриева Ю.С. Метод комплексной оценки параметров QoS в сетях SDN // Вестник связи. – 2026. – № 4. – С. 14-21.
7. Дмитриева Ю.С. Разработка модели балансировки нагрузки в мультиконтроллерной сети SDN с учетом параметров QoS // Электросвязь. – 2026. – № 02. – С. 55-61.
8. Дмитриева Ю.С. Разработка и апробация методики балансировки трафика на базе комбинированного параметра QoS в сетях SDN. / Ю.С. Дмитриева, В.С. Елагин // Труды учебных заведений связи. – 2026. – Т. 12. – № 2. – С. 36-44.

Публикации в других изданиях

1. Дмитриева Ю.С. Подходы к моделированию ресурсов SDN / Ю.С. Дмитриева, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 24-25 февраля 2021 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Том 4. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. – С. 305-309.
2. Дмитриева Ю.С. Исследовательские аспекты в программно-конфигурируемых сетях / Ю.С. Дмитриева, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 15-16 февраля 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – С. 407-413.
3. Дмитриева Ю.С. Параметры в SDN для прогнозирования сетевых событий / Ю.С. Дмитриева, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля – 1 марта 2023 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 399-403.

4. Дмитриева Ю.С. Модель принятия решения при миграции виртуальных систем в SDN / Ю.С. Дмитриева // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах, Санкт-Петербург, 27 февраля – 28 февраля 2024 года / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2024. – С. 282-287.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025662025. Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования / Дмитриева Ю.С., Елагин В.С., Рыбин И.П., Сербин А.А. Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования. Оpubл. 16.05.2025.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025662026. Серверная система создания, управления и балансировки нагрузки / Дмитриева Ю.С., Елагин В.С., Рыбин И.П., Сербин А.А. Оpubл. 16.05.2025.

3. Патент на промышленный образец от 27.02.2026 RU 151708 S. Графический интерфейс пользователя для отображения результатов исследования / Дмитриева Ю.С., Елагин В.С., Рыбин И.П., Сербин А.А.