

Научная статья

УДК 004.7

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-36-44>

EDN:FOVZUL



Разработка и апробация методики балансировки трафика в сетях SDN на базе комбинированного параметра QoS

Юлия Сергеевна Дмитриева✉, dmitrieva@sut.ru

Василий Сергеевич Елагин, v.elagin@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Рост трафика реального времени (видеосвязь, стриминг, облачные сервисы) предъявляет повышенные требования к качеству обслуживания в сетях. Традиционные методы балансировки нагрузки, ориентированные только на загрузку узлов сети, не учитывают потерю пакетов, задержку и джиттер. Существует потребность в усовершенствованных алгоритмах балансировки для программно-конфигурируемых сетей, способных динамически учитывать, как нагрузку трафика на узлы сети, так и его качественные характеристики.

Цель: разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная апробация методики балансировки сетевого трафика на базе комбинированного параметра качества для программно-конфигурируемых сетей, обеспечивающей соблюдение требований к качеству обслуживания клиентского трафика.

Методы: теоретический анализ SLA операторов связи для выявления ключевых параметров качества обслуживания в сетях, математическое моделирование и формализация процедуры нормализации разнородных параметров качества, метод балансировки трафика на основе модифицированного алгоритма Enhanced Weighted Round-Robin, с использованием разработанного программного обеспечения имитационного моделирования балансировки трафика в сети SDN.

Решение. Разработана методика динамической балансировки, с интегрированным расчетом комбинированного параметра качества обслуживания в сетях. Предложен механизм нормализации параметров качества в единый весовой коэффициент на основе анализа отраслевых стандартов. Экспериментально доказана эффективность: методика обеспечила равномерное распределение нагрузки и улучшение комбинированного показателя качества обслуживания в сетях на 46 % по сравнению с методикой балансировки только по нагрузке.

Новизна. Впервые разработана оригинальная адаптивная модель математической нормализации разнородных параметров Quality of Service. Создано специализированное программное обеспечение для имитационного моделирования и визуализации метода балансировки с учетом Quality of Service.

Практическая значимость. Разработка готового инструмента для моделирования и тестирования устойчивости инфраструктуры. Демонстрация практической реализации интеллектуальной балансировки для внедрения в контроллеры SDN.

Ключевые слова: SDN, балансировка нагрузки, QoS, алгоритм Enhanced Weighted Round-Robin, нормализация параметров QoS

Ссылка для цитирования: Дмитриева Ю.С., Елагин В.С. Разработка и апробация методики балансировки трафика в сетях SDN на базе комбинированного параметра QoS // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 2. С. 36–44. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-36-44. EDN:FOVZUL

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-2-36-44>

EDN:FOVZUL

Development and Testing of Traffic Balancing Techniques in SDN Networks Based on the Combined QoS Parameter

 Yulia S. Dmitrieva , dmitrieva@sut.ru

 Vasily S. Elagin, v.elagin@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Actuality. The growth of real-time traffic places increased demands on the quality of service in networks. Traditional load balancing methods, focused only on network node loading, do not take packet loss, delay, and jitter into account. There is a need for advanced balancing algorithms for software-configurable networks capable of dynamically taking into account both the traffic load on network nodes and its quality characteristics.

Purpose: development, theoretical justification, and experimental testing of network traffic balancing techniques based on a combined quality parameter for software-configurable networks, ensuring compliance with client traffic service quality requirements.

Methods: theoretical analysis of SLA communication operators to identify key parameters of the quality of service to all networks, mathematical modeling and formalization of the normalization procedure of various quality parameters, traffic balancing method based on the modified Enhanced Weighted Round-Robin algorithm, with the use of developed software for simulating traffic balancing in SDN networks. The solution. Development analysis of dynamic balancing techniques, with integrated calculation of the combined service quality parameter in networks. A mechanism for normalization of quality parameters is proposed.

Experimentally proven effectiveness: the algorithm ensured uniform distribution of the load and improved the combined indicator of the quality of service in networks by 46 % compared to the method of load balancing only.

Novelty. For the first time, an original adaptive model of mathematical normalization of various Quality of Service parameters was developed. Specialized software was created for simulation modeling and visualization of the balancing method taking into account Quality of Service.

Practical significance. Development of a ready-made tool for modeling and testing infrastructure stability. Demonstration of practical implementation of intellectual balancing for implementation in SDN controllers.

Keywords: SDN, load balancing, QoS, Enhanced Weighted Round-Robin algorithm, normalization of QoS parameters

For citation: Dmitrieva Yu.S., Elagin V.S. Development and Testing of Traffic Balancing Techniques in SDN Networks Based on the Combined QoS Parameter. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(2):36–44. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-2-36-44. EDN:FOVZUL

Введение

Развитие программно-конфигурируемых сетей (SDN, аббр. от англ. Software-Defined Networking) открыло новые возможности для гибкого управления сетевыми ресурсами, однако задача эффективного распределения трафика остается актуальной [1–4]. Традиционные методы балансировки нагрузки часто ориентированы исключительно на загрузку узлов сети, не учитывая качества обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service),

которое напрямую влияет на качество предоставляемых сервисов клиенту. Такие параметры, как потери пакетов (loss of packet), задержка (ping) и джиттер (jitter) являются критически важными для современных сервисов, особенно для трафика реального времени (от англ. Real Time).

В настоящей работе представлена методика балансировки сетевого трафика на базе комбинированного параметра QoS, разработанная для SDN. Целью исследования является разработка и апро-

бация методики динамической балансировки нагрузки, который наряду с загрузкой коммутаторов учитывает ключевые параметры QoS. Методика включает в себя механизмы непрерывного мониторинга, нормализации разнородных параметров QoS и принятия решений на основе алгоритма Enhanced Weighted Round-Robin.

Для проверки эффективности предложенного подхода была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования», позволяющая проводить эксперименты в контролируемых условиях и визуализировать их результаты в реальном времени. Работа направлена на повышение качества клиентских сервисов за счет интеллектуального распределения трафика, учитывающего как нагрузку на инфраструктуру, так и параметры QoS клиентского трафика.

Принципы работы методики на базе комбинированного параметра QoS

Методика динамического перераспределения нагрузки функционирует по образцу непрерывного циклического процесса, который можно представить, как последовательность этапов: мониторинг, анализ, принятие решения, выполнение действия, мониторинг. Цикличность методики позволяет системе постоянно адаптироваться к изменяющимся условиям сети, реагируя на возникающие или прогнозируемые перегрузки.

Основные принципы работы методики

1) Оптимизация ресурсов: главная цель – равномерно распределить нагрузку по всем доступным коммутаторам, избегая концентрации трафика на отдельных коммутаторах, что может привести к их перегрузке и деградации сервиса.

2) Автономность: после запуска алгоритм функционирует без вмешательства, автоматически принимая решения на основе собранных данных.

3) Простота и вычислительная эффективность: базовая реализация алгоритма Enhanced Weighted Round-Robin [5–6] ориентирована на непрерывную обработку данных и принятие решений, что важно для высоконагруженных систем.

Цикличность методики обеспечивает непрерывную обработку данных, где каждое принятое решение приводит к изменению состояния сети, которое затем снова анализируется для следующего цикла принятия решений.

Методика балансировки трафика коммутаторов по комбинированному параметру QoS

Рассмотрим этапы методики балансировки трафика коммутаторов, используя алгоритм EWRR (рисунок 1, где X – максимальный порог нагрузки на коммутатор).

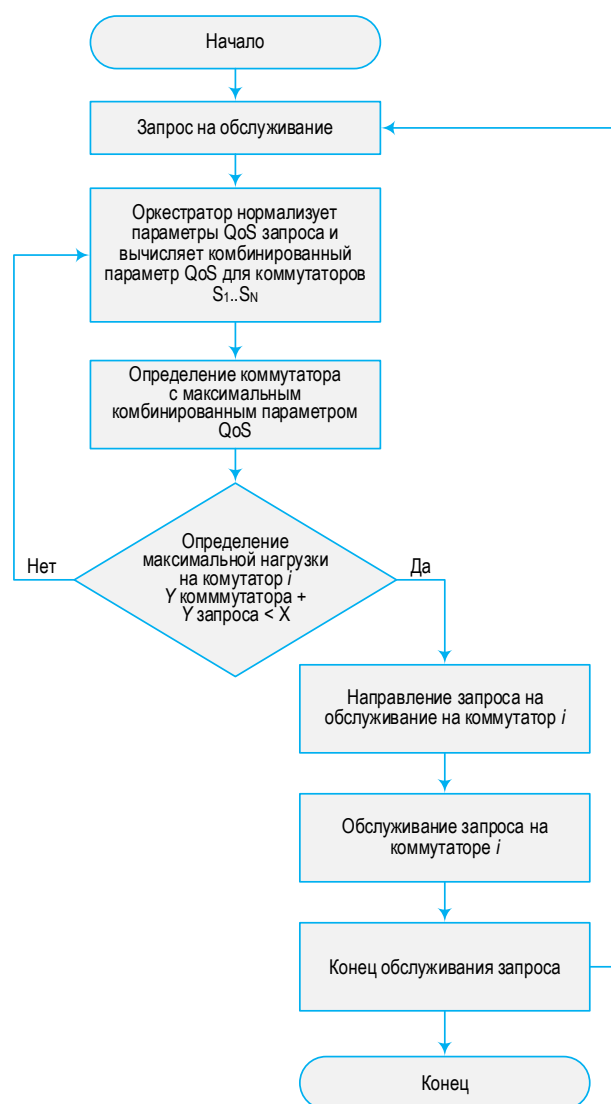


Рис. 1. Методика балансировки трафика коммутаторов по комбинированному параметру QoS

Fig. 1. The Method of Balancing Switch Traffic on the Combined QoS Parameter

Основой для принятия решения является актуальная и точная информация о состоянии сети. В разработанной модели реализован непрерывный механизм сбора и первичного анализа параметров коммутаторов (нагрузка, параметры QoS). Параметры коммутатора анализируются с заданной частотой (например, несколько раз в секунду или через фиксированные интервалы указанного модельного времени). Это обеспечивает актуальность данных, что критически важно для оперативного реагирования на быстрые изменения нагрузки и параметров QoS.

Сначала поступает поток запросов на обслуживание. Далее осуществляется нормализация параметров QoS запроса и вычисление комбинированного параметра для коммутаторов $S1..Sn$.

Для балансировки нагрузки необходимо учитывать параметры QoS коммутаторов по значимым в данной сети характеристикам. В интересах повышения качества клиентских сервисов требуется принимать во внимание не только нагрузку на коммутаторе, но и параметры QoS для запроса [7–8]. Как образец требований к качеству клиентских сервисов возможно взять общедоступные договора российских операторов связи, в них указываются конкретные параметры QoS для разного типа трафика и уровня SLA [8]. Анализ договоров показал, что все операторы связи указывают требования к трем параметрам QoS: jitter, ping, loss of packet.

При балансировке сетевого трафика на базе параметров QoS учитываются величины с разными единицами измерения и возникает вопрос о нормализации параметров QoS, так как они различны по

своим единицам измерения. Параметры QoS оказывают определенное влияние на сервис, поэтому необходимо оценить «вес» каждого из них при балансировке трафика, для чего определяем нормализующие коэффициенты C_{ij} для всех параметров.

Методика балансировки нагрузки коммутаторов на базе параметров QoS будет выглядеть следующим образом: чтобы решить, на какой коммутатор перенаправить соединение, оркестратору необходимо сравнить значения соответствующих параметров для каждого коммутатора. Для этого необходимо сформировать из собранных параметров матрицу B (1) с b_{ij} , где i – порядковый номер параметра ($i = 1, \dots, k$), $k = 3$; j – номер коммутатора ($j = 1, \dots, n$); $b_{\ell p}$, b_{ping} , b_{jitter} – значения параметров loss of packet, ping и jitter, соответственно; n – количество коммутаторов.

$$B = \|b_{ij}\|_{(3 \times n)} = \begin{pmatrix} C_{11}b_{\ell p_1} & C_{21}b_{\ell p_2} & \dots & C_{n1}b_{\ell p_n} \\ C_{12}b_{\text{ping}_1} & C_{21}b_{\text{ping}_2} & \dots & C_{n2}b_{\text{ping}_n} \\ C_{13}b_{\text{jitter}_1} & C_{23}b_{\text{jitter}_2} & \dots & C_{n3}b_{\text{jitter}_n} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Элемент b_{ij} в матрице B (1) умножается на нормализующий коэффициент C_{ij} , который определяется с помощью следующего выражения:

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

Таким образом, получаем информацию о коммутаторе с наилучшим комбинированным параметром QoS.

Алгоритм нормализации параметров QoS коммутатора

Произведем поэтапно расчет нормализованной суммы параметров QoS для коммутатора:

$$w_{\text{QoS}} = w_{\ell p} + w_{\text{ping}} + w_{\text{jitter}}, \quad (2)$$

где $w_{\ell p}$, w_{ping} , w_{jitter} – нормализованный «вес» значений параметров loss of packet, ping и jitter, соответственно.

Для нормализации параметров QoS необходимо привести значения в разных единицах измерения к одному виду. Введем пределы параметров loss of packet, ping и jitter (для примера возьмем параметры QoS из договора крупного оператора связи).

Этап 1. Введем ограничения для рассматриваемых параметров:

ℓp от 0 до 0,1 %;
ping от 1 до 100 мс;
jitter от 0 до 20 мс.

Этап 2. Произведем нормализацию, т. е. приведем к единому виду параметры, имеющие разные единицы измерения:

ℓp от 0 до 0,1 % умножаем на 10000 и делим на 10;
ping от 1 до 100 мс делим на 100;
jitter от 0 до 20 мс делим на 20.

Этап 3. Применим нормализующий коэффициент потери пакетов (из договоров операторов связи для трафика Real Time значения параметров QoS самые строгие и равнозначны между собой):

$$C_{1j} = 0,33; C_{2j} = 0,34; C_{3j} = 0,33,$$

где нормализующие коэффициенты: C_{1j} – потери пакетов, C_{2j} – задержка; C_{3j} – джиттер.

Выполнив первые три действия, получим весовой коэффициент параметров QoS коммутатора для (2):

$$w_{\text{QoS}} = \frac{\ell p \times 10000}{10} \times 0,33 + \frac{\text{ping}}{100} \times 0,33 + \frac{\text{jitter}}{20} \times 0,34.$$

Этап 4. Определим перегрузки – не превышает ли значение нагрузки с данным запросом на коммутаторе максимально возможную:

$$W_{\text{Ком}} + W_{\text{Ожидаемая запроса}} < X.$$

Этап 5. Направим запрос на выбранный коммутатор с максимальным QoS или в оркестратор для повторной обработки (при перегрузке коммутаторов).

Методика обеспечивает в режиме реального времени мониторинг состояния всех моделируемых коммутаторов сетевой инфраструктуры, который служит основой для принятия решений алгоритмом.

Программная инструментализация методики

Для проверки методики балансировки нагрузки на базе комбинированного параметра QoS создана программа для ЭВМ под названием «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» [9]. Она позволяет пользователю взаимодействовать с серверной системой через интуитивно понятный интерфейс, обеспечивая визуализацию результатов имитационного моделирования в виде графиков. Настройка параметров эксперимента обеспечивается с помощью удобных ползунков и панели управления, позволяя гибко изменять условия моделирования. Кроме того, программа для ЭВМ способствует ускоренному анализу данных, предоставляя пользователю возможность наблюдать динамическое поведение моделей в реальном времени, и осуществляет установку соединения с сервером и передачу параметров эксперимента, обеспечивая точную настройку и мониторинг работы имитационной модели.

Разработанная имитационная модель представляет собой программную реализацию, предназначенную для воспроизведения поведения сетевой инфраструктуры в контролируемой среде. Ее архитектура построена на принципе дискретно-событийного моделирования, что позволяет эффективно моделировать прохождение трафика через типовые сегменты сети. Сетевая инфраструктура моделируется как совокупность независимых узлов сети, характеристики которых настраиваются индивидуально. Взаимодействие между узлами осуществляется через механизмы динамического перенаправления трафика, имитирующие изменение маршрутизации в реальных сетях. Ключевое внимание уделяется моделированию источников нагрузки, которые характеризуются интенсивностью генерации трафика и возможностью динамического переключения целевого узла сети. Это позволяет методике балансировки перенаправлять потоки трафика между узлами в реальном времени.

Для обеспечения управления системой непрерывно собираются основные метрики состояния каждого узла (загрузка, параметры QoS). На основе этих данных работает алгоритм динамического перераспределения нагрузки, функционирующий по циклическому принципу: мониторинг, анализ, принятие решения, выполнение действия, мониторинг. Этот процесс позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям сети и минимизировать перегрузки.

Программная реализация системы построена по клиент-серверной архитектуре. Клиентская часть отвечает за взаимодействие с пользователем, настройку экспериментов и визуализацию данных. Серверная часть реализует логику имитационного

моделирования, расчет метрик и работу методики балансировки. Взаимодействие между компонентами обеспечивает управление моделированием в реальном времени, визуализацию состояния сети и сохранение результатов для последующего анализа. В левой части экрана находится скрываемая панель управления экспериментом (рисунок 2), а в верхней части меню «Setup» расположены кнопки команд:

«create» – создание эксперимента с текущими характеристиками;
«start» – запуск эксперимента;
«stop» – завершение эксперимента;
«download» – загрузка результатов эксперимента в формате Excel.

В части меню «Board settings» позволяет пользователю управлять характеристиками эксперимента. При изменении любого из параметров необходимо пересоздать эксперимент, чтобы настройки стали актуальными для сервера.

Для настройки моделей эксперимента используются слайдеры настройки:

- количества моделей (минимальное значение – 1, максимальное – 10);
- минимального значения диапазона количества приходящих в модель агентов (минимальное значение – 1, максимальное – 20);
- максимального значения диапазона количества приходящих в модель агентов (минимальное значение – 5, максимальное – 100);
- интервала времени прихода агентов в модели (минимальное значение – 100 мс, максимальное – 10000 мс);
- интервала времени взятия статистики с моделей (минимальное значение – 100 мс, максимальное – 10000 мс);
- количества Source элементов в каждой модели (минимальное значение – 1, максимальное – 10);
- минимального значения диапазона количества мест в Queue элементе у моделей (минимальное значение – 1, максимальное – 25);
- максимального значения диапазона количества мест в Queue элементе у моделей (минимальное значение – 5, максимальное – 100);
- минимального значения диапазона количества мест в Delay элементе у моделей (минимальное значение – 1, максимальное – 25);
- максимального значения диапазона количества мест в Delay элементе у моделей (минимальное значение – 5, максимальное – 100);
- значения времени обслуживания агента в Delay элементе у моделей (минимальное значение – 100 мс, максимальное – 10000 мс);
- значения коэффициента загруженности, при котором происходит принятие решения о переводе потока агентов (минимальное значение – 0,1, максимальное – 1).

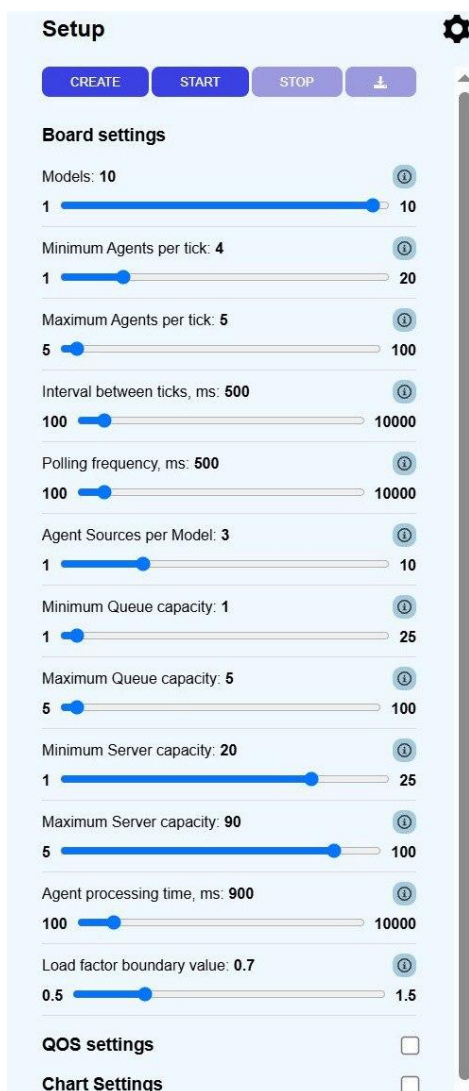


Рис. 2. Панель управления и конфигурации параметров эксперимента

Fig. 2. Control Panel and Configuration of Experiment Parameters

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 3).

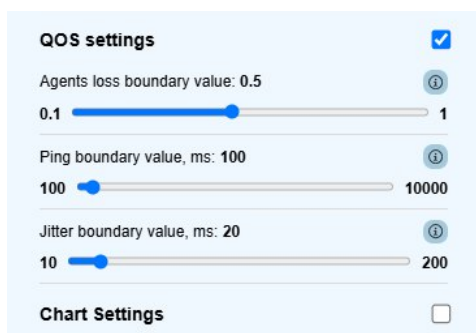


Рис. 3. Параметры QoS эксперимента

Fig. 3. QoS Parameters of the Experiment

Для настройки QoS в эксперименте используются слайдеры настройки для агентов:

- величина loss of packet, параметр задает значение QoS loss of packet (минимальное значение находится в диапазоне от 0 до 0,1 %, максимальное – от 0 до 1 %);
- значения ping, параметр задает значение QoS ping (минимальное значение находится в диапазоне от 0 до 100 мс, максимальное – от 0 до 10000 мс);
- значения jitter, параметр задает значение QoS jitter (минимальное значение находится в диапазоне от 0 до 10 мс, максимальное значение – от 0 до 200 мс);
- количества хранимых и отображаемых на графиках данных эксперимента.

Если флаг настроек системы визуализации статистики не активен, то все данные будут отображаться на графиках и не будут сохранены в файл ModelsParametersStatistic.exsx. При активном флаге появляется слайдер для контроля за сохраняемыми и отображаемыми данными на графиках эксперимента. Область эксперимента – блоки информации о каждой модели – представлена на рисунке 4, где отображаются два графика: нагрузка на моделируемый коммутатор и очередь на обслуживание. Область обновляется в реальном времени, интервал обновления задается в панели управления.

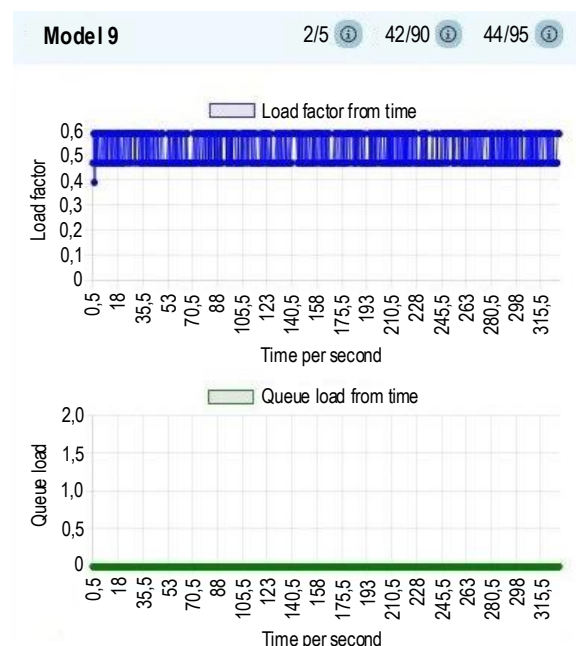


Рис. 4. Область эксперимента на примере модели 9

Fig. 4. The Field of Experiment on the Example of Model 9

Экспериментальная апробация

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

Зададим параметры имитационного моделирования в программе:

- 1) эксперимент проводится на 10 коммутаторах;
- 2) значения комбинированного параметра QoS:
 - $lp_1, lp_2, lp_3, \dots, lp_{10}$ (параметр loss of packet в 0,1 %, $\Delta = 0..10$);
 - $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{10}$ (параметр ping в мс $\Delta = 1..100$);
 - $j_1, j_2, j_3, \dots, j_{10}$ (параметр jitter в мс $\Delta = 0..20$);
- 3) максимальная загрузка коммутаторов 70 %.

С указанными параметрами на снимке экрана (рисунок 5) провели эксперимент.

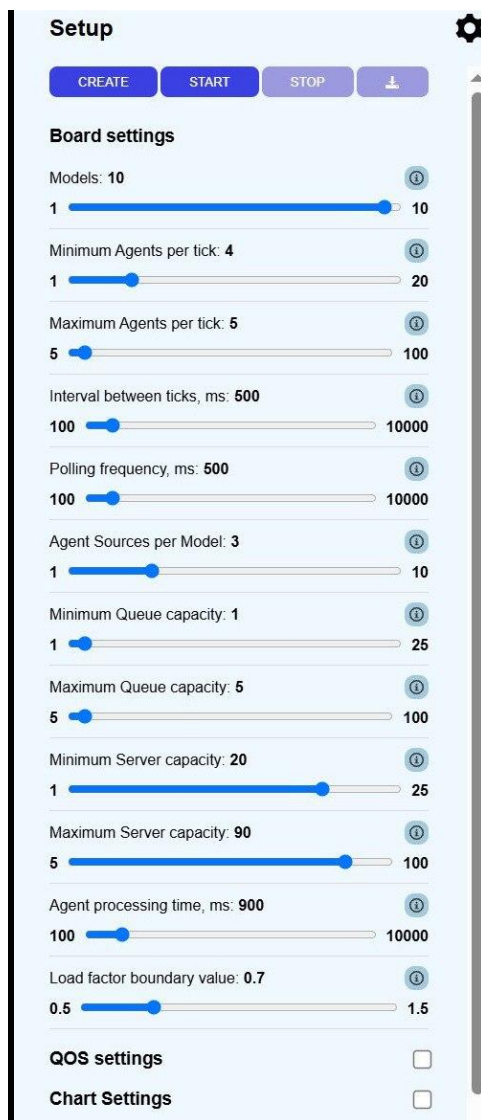


Рис. 5. Панель с конфигурацией параметров эксперимента

Fig. 5. Panel with Configuration of Experiment Parameters

Графическое отображение эксперимента представлено на рисунке 6а, где продемонстрирована балансировка трафика для модели 5. Видно, что на коммутатор номер 5 в начале эксперимента поступает большое количество заявок на обслуживание и образуется очередь из агентов на обслуживание.

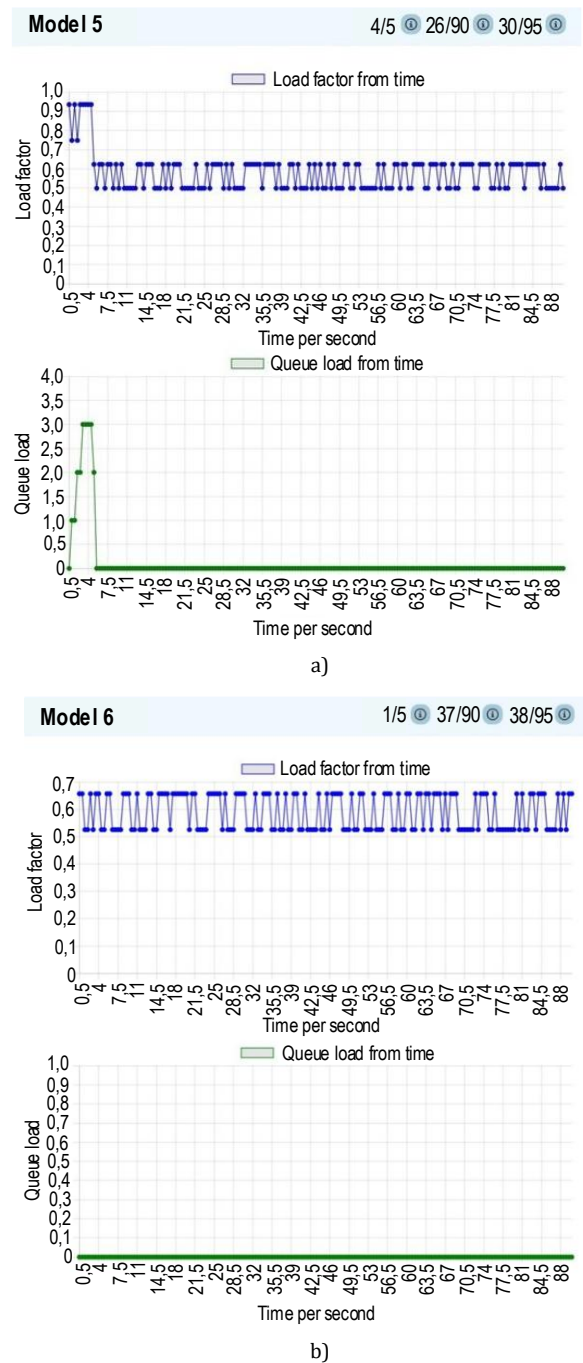


Рис. 6. Графическое изображение эксперимента на примере модели 5 (а) и модели 6 (б)

Fig. 6. Graphic Representation of the Experiment Using the Example of Model 5 (a) and Model 6 (b)

Нагрузка на модель 5 равна 0,95–4 с и далее становится равномерной на всем этапе эксперимента. С 5-й секунды алгоритм равномерно распределяет нагрузку (агентов) по моделям, и график нагрузки становится равномерным и однородным для всего остального времени эксперимента. В то же время с 5-й секунды равномерное распределение трафика по другим агентам демонстрирует, что очередь на данную модель становится равной 0, т. е. каждый

поступивший запрос обрабатывается сразу – следовательно, нагрузка на все коммутаторы распределяется корректно и равномерно. Таким образом, график (см. рисунок 6а) отображает корректную работу алгоритма в части балансировки трафика и распределения поступающих запросов на все модели эксперимента с равномерной нагрузкой на каждую модель из 10.

На модель 6, представленную на снимке экрана (рисунок 6б) 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 «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» проведено два эксперимента по балансировке нагрузки между коммутаторами. Один эксперимент с учетом нагрузки, а второй по параметрам QoS. Создается файл с результатами статистических данных эксперимента с названием ModelsParametersStatistic.exsx. На основании этих данных построены графики (рисунок 7).

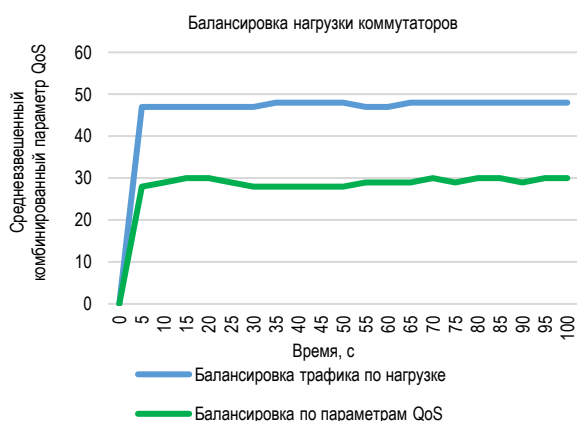


Рис. 7. Сравнительный анализ методов балансировки по нагрузке и на базе параметров QoS

Fig. 7. Comparative Analysis of Balancing Methods by Load and Based on QoS Parameters

При использовании методики балансировки только по нагрузке комбинированный показатель QoS остается на относительно низком уровне, с заметными колебаниями, что свидетельствует о нестабильности качества обслуживания. При применении предложенной методики балансировки на базе комбинированного параметра QoS показатель значительно повышается, демонстрируя устойчивое улучшение качества обслуживания. Предложенная методика обеспечила уменьшение комбинированного показателя QoS на 46 % по сравнению

с методом балансировки (чем меньше этот параметр, тем выше качество предоставляемых услуг), учитывающим только нагрузку на узлы сети. Это подтверждает эффективность интеграции параметров QoS (loss of packet, ping и jitter) в алгоритм принятия решений при балансировке трафика в сетях SDN.

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно разработана и апробирована методика балансировки трафика на базе комбинированного параметра QoS для сетей SDN, основанная на принципах цикличности (мониторинг – анализ – решение – действие – мониторинг), автономности и вычислительной эффективности. В ее основу положен модифицированный алгоритм Enhanced Weighted Round-Robin, дополненный механизмом учета трех ключевых параметров QoS: loss of packet, ping и jitter.

Кроме того, предложен механизм нормализации разнородных параметров QoS, позволяющий приводить значения с разными единицами измерения к единой безразмерной шкале. На основе анализа SLA крупных российских операторов связи были определены весовые коэффициенты для каждого параметра, что обеспечивает объективность и адаптивность принятия решений.

Проведена экспериментальная апробация методики в контролируемых условиях (с использованием программы для ЭВМ «Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования» [2]). Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенной методики: 1) обеспечено равномерное распределение нагрузки между коммутаторами; 2) продемонстрирована способность системы оперативно реагировать на пиковые нагрузки и перераспределять трафик для предотвращения перегрузок отдельных узлов сети; 3) комбинированный показатель QoS уменьшился на 46 % по сравнению с балансировкой, учитывающей только загрузку узлов.

Таким образом, предложенная методика балансировки трафика на базе комбинированного параметра QoS доказала свою практическую значимость и эффективность. Она позволяет не только оптимизировать использование сетевых ресурсов, но и гарантировать соблюдение согласованных уровней качества обслуживания (SLA), что является критически важным для операторов связи и поставщиков облачных сервисов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию методики для более сложных сетевых топологий и интеграцию с системами прогнозирования нагрузки.

Список источников

1. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008;38(2):69–74. DOI:10.1145/1355734.1355746.
2. ONF TR-502. SDN architecture. 2014. URL: https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/02/TR_SDN_ARCH_1.0_06062014.pdf (Accessed 20.01.2026)
3. RFC 7426 Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology // IETF.org. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7426> (Accessed 20.01.2026)
4. SDN Architecture Overview. Version 1.0. Open Networking Foundation. 2013. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/TR-521_SDN_Architecture_overview.pdf (Accessed 20.01.2026)
5. Sinha G., Sinha D.K. Enhanced Weighted Round Robin Algorithm to Balance the Load for Effective Utilization of Resource in Cloud Environment // *EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems*. 2020. Vol. 6. Iss. 18. DOI:10.4108/eai.7-9-2020.166284
6. Priya S.S., Rajendran T. Enhanced Weighted Round Robin: A New Paradigm in Cloud Load Balancing // *Indian Journal of Science and Technology*. 2025. Vol. 18. Iss. 15. PP. 1220–1228. DOI:10.17485/IJST/v18i15.3976
7. Rec. ITU-Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. 2011.
8. Рекомендация МСЭ-Т E.800 Определения терминов, связанных с качеством обслуживания. 2008.
9. Дмитриева Ю.С., Елагин В.С., Рыбин И.П., Сербин А.А. Клиентская панель управления, настройки и визуализации результатов экспериментов имитационного моделирования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025662025 от 29.04.2025. Оpubл. 16.05.2025. EDN:NNHGGO

References

1. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008;38(2):69–74. DOI:10.1145/1355734.1355746.
2. ONF TR-502. SDN architecture. 2014. URL: https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/02/TR_SDN_ARCH_1.0_06062014.pdf [Accessed 20.01.2026]
3. IETF.org. RFC 7426 Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7426> (Accessed 20.01.2026)
4. SDN Architecture Overview. Version 1.0. Open Networking Foundation. 2013. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/TR-521_SDN_Architecture_overview.pdf [Accessed 20.01.2026]
5. Sinha G., Sinha D.K. Enhanced Weighted Round Robin Algorithm to Balance the Load for Effective Utilization of Resource in Cloud Environment. *EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems*. 2020;6(18). DOI:10.4108/eai.7-9-2020.166284
6. Priya S.S., Rajendran T. Enhanced Weighted Round Robin: A New Paradigm in Cloud Load Balancing. *Indian Journal of Science and Technology*. 2025;18(15):1220–1228. DOI:10.17485/IJST/v18i15.3976
7. Rec. ITU-Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. 2011
8. Rec. ITU-T E.800 Definitions of terms related to quality of service. 2008.
9. Dmitrieva Yu.S., Elagin V.S., Rybin I.P., Serbin A.A. Client Panel for Control, Settings and Visualization of the Results of Simulation Modeling Experiments. Patent RF, no 2025662025, 29.04.2025. (in Russ.) EDN:NNHGGO

Статья поступила в редакцию 16.01.2026; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 09.02.2026

The article was submitted 16.01.2026; approved after reviewing 26.01.2026; accepted for publication 09.02.2026

Информация об авторах:

**ДМИТРИЕВА
Юлия Сергеевна**

старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-7736-7121>

**ЕЛАГИН
Василий Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-4077-6869>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.