

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 621.395.4

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN

 Г.В. Слюсарев , В.П. Мочалов , Д.В. Гостева  

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

✉ DVGus@yandex.ru

EDN: MPFRRV

Аннотация

Введение. Достоверное выявление вероятностно-временных особенностей узлов коммутации необходимо для оценки количественных характеристик программно конфигурируемых сетей. Широко используемые методы теории массового обслуживания (ТМО) лишь приближенно определяют и моделируют процессы в коммутаторе OpenFlow и его буферной памяти. Это ведет к получению заниженных, не реалистичных характеристик проектируемых сетевых устройств, перегрузке буферной памяти коммутаторов и потере сетевых пакетов. Проблему может решить иной подход к моделированию. Цель представленной работы — создание и исследование аналитической модели буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN с использованием усовершенствованных методов ТМО.

Материалы и методы. Задействовали аппарат дискретного преобразования Лапласа–Стилтьеса. Учитывались статистические характеристики потоков пакетов и пропускная способность каналов связи при заданной вероятности потерь пакетов. Модель буферной памяти коммутатора OpenFlow базируется на математическом аппарате ТМО. Его строили в предположении рекуррентности входных потоков данных с групповым поступлением. Исходили из схематически представленных структур коммутатора, набора его записей и графового описания передачи выходящих из коммутатора сетевых пакетов. Приняли как допустимые два ограничения модели:

- произвольное распределение зависимости между объемом потоков данных и временем их обслуживания;
- дискретность распределения структуры информационных потоков.

Результаты исследования. Созданная модель интегрирует вероятность потери потоков пакетов, их статистические характеристики, пропускную способность вычислительных устройств и процедуру многофазного обслуживания. При проверке работоспособности модели приняли, что загрузка коммутатора увеличивается от 0,1 до 0,9, а вероятность потери — от 10^{-3} до 10^{-6} . Для этих показателей выяснили, как от загрузки коммутатора зависят объем буферной памяти и время ожидания. В первом случае минимальное значение (объем памяти) — 0,201, максимальное — 10564. Во втором — 0 и 470 мс соответственно. Для имитационного моделирования минимум по времени — 0 мс, максимум — 2300 мс. Показатели имитационного и аналитического моделирования близки при загрузке менее 50 % и увеличиваются в несколько раз при загрузке более 50 %. Показатели резко возрастают с загрузкой до 70 %, а затемкратно увеличиваются.

Обсуждение. При невысокой сетевой загрузке очереди не переполняются, пакеты не теряются, сохраняются линейные зависимости. При средней и высокой загрузке обработка потоков пакетов описывается нелинейными зависимостями. Результаты аналитического и имитационного моделирования расходятся из-за взрывообразного характера самоподобного сетевого трафика и его приближенного описания распределением Парето. Загруженность коммутатора определяет целесообразность применения предложенного подхода. Модель подойдет при проектировании элементов программно конфигурируемых сетей для анализа их устойчивости при различных информационных воздействиях.

Заключение. Предложенная аналитическая модель SDN определяет значения и дисперсии объема буферной памяти коммутатора, а также объемы памяти для построения таблиц потоков адресации. Работоспособность решения проверили при загрузке коммутатора от 0,1 до 0,9. Планируется создать модель, учитывающую потоки заявок как из внешней сети, так и от сервера.

Ключевые слова: совершенствование методов теории массового обслуживания, аналитическая модель буферной памяти OpenFlow, потеря сетевых пакетов, имитационное моделирование коммутатора

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции, академическому редактору и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Слюсарев Г.В., Мочалов В.П., Гостева Д.В. Аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2221. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Original Theoretical Research

Analytical Model of the Buffer Memory of an OpenFlow Switch in a Software-Defined Network (SDN)

Gennady V. Slyusarev , Valery P. Mochalov , Dar'ya V. Gosteva  

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

 DVGus@yandex.ru

Abstract

Introduction. Reliable identification of the probabilistic and temporal features of switching nodes is required for assessing the quantitative characteristics of software-defined networks. Widely used queuing theory (QT) methods only approximately specify and model the processes in an OpenFlow switch and its buffer memory. This results in understated and unrealistic performance estimates for the designed network equipment, causing switch buffer overloading and packet loss. A different modeling approach can solve this problem. The objective of this paper is to develop and study an analytical model for the buffer memory of an OpenFlow switch in an SDN using advanced techniques.

Materials and Methods. The discrete Laplace-Stieltjes transform was used. Statistical characteristics of packet flows and the throughput of communication channels for a given packet loss probability were taken into account. The OpenFlow switch buffer memory model was based on the mathematical apparatus of the QT. It was constructed under the assumption of recurrence of input data flows with batch arrivals. The model was based on schematic representations of the switch structure, its record set, and a graph description of the transmission of network packets leaving the switch. We started with schematic representations of the switch structure, its record set, and a graph description of the transmission of network packets exiting the switch. Two model assumptions were taken as acceptable:

- arbitrary distribution of the relationship between the volume of data flows and their service time;
- discreteness of the distribution of the information flow structure.

Results. The developed model integrated the probability of packet flow loss, their statistical characteristics, the throughput of computing devices, and the multiphase service procedure. When testing the model performance, we assumed that the switch load increased from 0.1 to 0.9, and the loss probability — from 10^{-3} to 10^{-6} . For these metrics, we determined how the switch load affected the buffer memory size and latency. In the first case, the minimum value (memory capacity) was 0.201, the maximum — 10564. In the second, they were 0 and 470 ms, respectively. For simulation modeling, the minimum time was 0 ms, the maximum — 2300 ms. The simulation and analytical modeling indicators were close at loads below 50% and increased several times at loads above 50%. The indicators increased sharply with loads up to 70%, and then increased exponentially.

Discussion. At low network loads, queues did not overflow, packets were not lost, and linear dependences were maintained. At medium and high loads, packet flow processing was described by nonlinear dependences. The results of analytical and simulation modeling diverged due to the explosive nature of self-similar network traffic and its approximate description by the Pareto distribution. Switch load determined the feasibility of the proposed approach. The model is suitable for designing elements of software-defined networks to analyze their resilience under various information impacts.

Conclusion. The proposed SDN analytical model determined the values and variances of the switch buffer memory size, as well as the memory capacity for constructing address flow tables. The solution performance was tested with switch loads ranging from 0.1 to 0.9. It is planned to create a model that takes into account request flows from both the external network and the server.

Keywords: improving queueing theory methods, OpenFlow buffer memory analytical model, network packet loss, switch simulation modeling

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved its quality.

For Citation. Slyusarev GV, Mochalov VP, Gosteva DV. Analytical Model of the Buffer Memory of an OpenFlow Switch in a Software-Defined Network (SDN). *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2221. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Введение. Программируемые сети SDN и протокол управления сетевыми устройствами OpenFlow создавались для повышения автоматизации управления современными компьютерными сетями и поддержки заданного качества облачных сервисов, то есть для задач, решаемых путем динамического перераспределения сетевых ресурсов между пользователями. Один из основных элементов программно управляемых сетей — коммутатор потоков OpenFlow, а его важнейшая часть — буферная память. Используя внутренний программный конвейер, коммутатор распределяет и балансирует нагрузки между каналами сетевой структуры. Так достигается гибкость централизованного управления ресурсами сети.

Оценка количественных характеристик функционирования сетей включает выявление вероятностно-временных особенностей узлов коммутации. Для этого широко используются методы теории массового обслуживания (ТМО), которые лишь приближенно определяют и моделируют процессы в коммутаторе OpenFlow и его буферной памяти. Это ведет к получению заниженных, не реалистичных характеристик проектируемых сетевых устройств, перегрузке буферной памяти коммутаторов и потере сетевых пакетов. Для устранения проблемы предлагается иной подход к моделированию. Цель представленной работы — создание и исследование аналитической модели буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN с использованием усовершенствованных методов ТМО. Для достижения цели используется аппарат дискретного преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС), учитываются статистические характеристики потоков пакетов и пропускная способность каналов связи при заданной вероятности потерь пакетов. Подобная математическая модель на основе классической ТМО описана в [1], но она не устраняет проблемы, которые возникают из-за приближенного описания сетевых процессов.

В научной литературе предлагаются конструктивные решения для совершенствования элементов сетей передачи данных, что говорит о важности и актуальности решаемой научно-технической задачи. Моделям OpenFlow коммутаторов программно управляемых сетей SDN посвящены работы Рагхава С.С., Баскакова А.Е., Волкова А.С., Филиппова И.А., Никишина К.И., Гурина Е.И., Тихоненко О.М., Горбунова А.В., Лебедева А.В., Самуйлова К.Е., Шалимова И.А. и др. В [2] приводится достаточно полный обзор сетевых решений, основанных главным образом на классической ТМО. Исследуются системы конечной пропускной способности с рекуррентным входным потоком, марковским процессом обслуживания и накопителями бесконечного объема. Методы моделирования базируются на замене рекуррентных потоков заявок простейшими. Зависимость объема требований от времени обслуживания предполагается заданной, или ею пренебрегают. Вероятность потерь пакетов принимается пренебрежимо малой. В подобных моделях, как правило, используется не всегда верное утверждение, что потоки пакетов теряются, если занят весь объем буферной памяти. Предполагается также неограниченный суммарный объем памяти и вполне определенный характер связи между объемом сообщений и временем обслуживания. В большинстве публикаций отсутствуют конечные выражения, позволяющие анализировать качество обслуживания коммутатора с учетом особенностей распределения буферной памяти, показателями потерь и нагрузки. В этих случаях авторы пользуются численными методами готовых программных пакетов.

Научная новизна представленного исследования заключается в усовершенствовании классических методов ТМО, обеспечивающих исследование систем с произвольно распределенными функциями поступления и обслуживания заявок. Практическая значимость результатов работы подтверждается двумя факторами. Во-первых, создается аналитическая модель буферной памяти коммутатора OpenFlow сети SDN, обеспечивающая достаточно точное ее исследование. Во-вторых, открывается возможность выбора альтернативных вариантов построения на этапе проектирования. Результативность предлагаемой модели оценивается при моделировании. Полученные показатели качества позволяют оценить эффективность коммутатора OpenFlow сети SDN.

Материалы и методы. Входной поток пакетов сети SDN поступает на коммутатор OpenFlow, который извлекает метаданные, проверяет их на соответствие записям в адресных таблицах и формирует направление передачи. Сетевая операционная система контроллера SDN распределяет пакеты по потокам, которые конфигурирует классификатор OpenFlow. Коммутатор OpenFlow объединяет множество таблиц потоков, управляемых центральным контроллером с помощью инструкций и пересылки пакетов. Контроллер SDN периодически меняет свои записи о структуре сети, нагрузке, используемых ресурсах, резерве. В соответствии с этим он устанавливает правила пересылки для всех поступивших потоков, последовательно распределяет их по выходным OpenFlow портам коммутатора, устанавливает новые параметры действий и выполняет потоковую рассылку или передачу обратно в сеть. При этом задействуется программный конвейер коммутатора в виде последовательных таблиц потоков.

Пакеты, не идентифицированные в таблицах потоков, передаются на другой порт коммутатора или пересылаются контроллеру для изменения полей. SDN-контроллер формирует выходные порты коммутатора, адресные таблицы, а также классификаторы потоков данных [3].

Вопросам управления сетевыми устройствами уделяется большое внимание, есть готовые конструктивные решения. Несмотря на это, создаются новые эффективные методы и протоколы управления сетевой нагрузкой, постоянно дорабатываются протоколы управления сетями. Небольшой срок опытной эксплуатации сетей SDN и отсутствие систематизированных результатов тестирования коммутационного оборудования на платформе OpenFlow вызывают необходимость дальнейших исследований с применением аналитических и имитационных моделей.

Таким образом, структурную схему коммутатора можно представить в виде системы массового обслуживания (СМО) с ограниченным объемом памяти. На ее вход поступает поток пакетов с произвольными законами распределения числа и объемов требований. Режим работы такой системы будет стационарным, если среднее число требований, поступающих за единицу времени, не превышает максимально возможной скорости их обслуживания. При этом одна из важнейших задач — определение средних значений и дисперсии общего объема буферной памяти коммутатора, а также объемов памяти для построения таблиц потоков [4]. Предположим, что на входе высокопроизводительного центрального управляющего сервера нет очередей потоков пакетов. В этом случае функционирование коммутатора в стационарном режиме можно описать аппаратом систем массового обслуживания с преобразованиями Лапласа-Стилтьеса. Распределение и обработка данных с помощью программного конвейера моделируется как многофазный случайный процесс [5].

Усовершенствованный метод ТМО, используемый в данной работе, позволяет формировать модели многих реальных систем, в том числе коммутационных. Можно обоснованно предположить, что есть стационарные характеристики подобных систем, и параметры входного потока пакетов не влияют на очередность и время его обслуживания. Считаем также, что каждый поток характеризуется некоторым случайным количеством пакетов, т.е. его объем принимает только положительные дискретные значения, и это с большой долей вероятности отражает реальную ситуацию.

Конвейер адресации коммутатора состоит из одной или нескольких последовательно соединенных таблиц адресации. Входной сетевой трафик, описываемый произвольным законом распределения, поступает на конвейер и последовательно обрабатывается k таблицами адресации.

Предполагается, что время обработки запросов каждой таблицей случайно и подчиняется экспоненциальному закону. Сумма времен всех пройденных этапов обработки формирует итоговое распределение времени обслуживания (распределение Эрланга k -го порядка). Известно, что поток Эрланга k -го порядка с параметрами (μ, r) можно представить в виде суммы r случайных потоков с параметрами μ_i , а характеристики рассматриваемой системы можно получить из характеристик составляющих ее элементов [6]. Тогда стационарные вероятности $p(i_1, \dots, i_r)$ рассматриваемой системы:

$$p(i_1, \dots, i_r) = \prod_{k=1}^r \lim_{t \rightarrow \infty} p\{i_k(t) = i_k\}.$$

Структура набора записей коммутатора приведена на рис. 1.

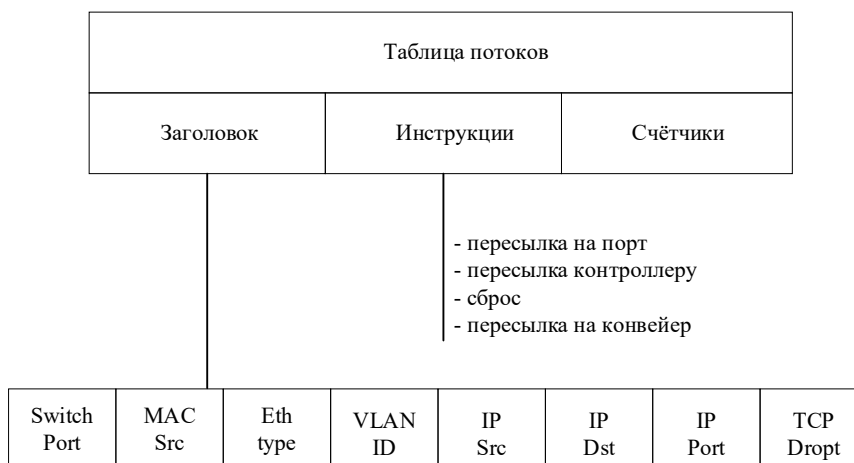


Рис. 1. Структура набора записей коммутатора

Упрощенная структура OpenFlow коммутатора представлена на рис. 2.

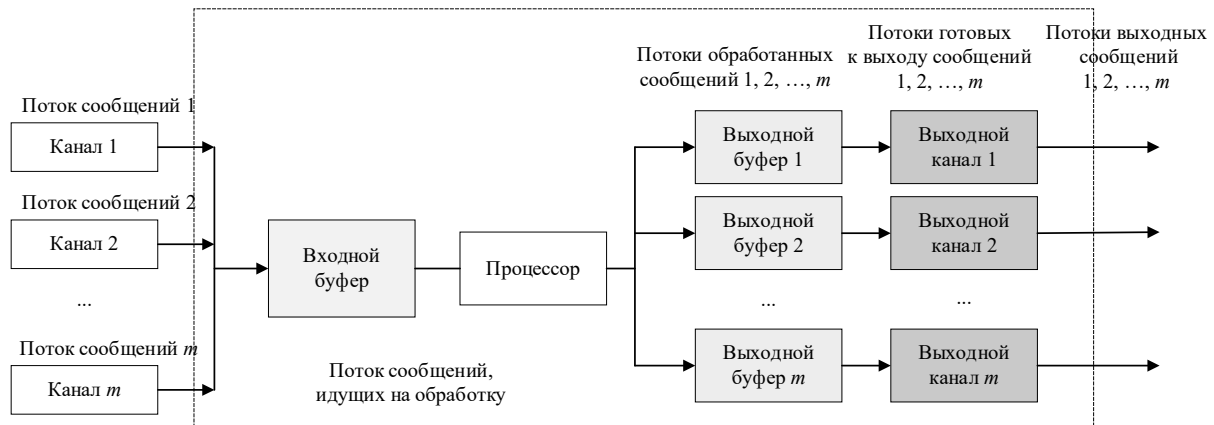


Рис. 2. Структура OpenFlow коммутатора

Временные интервалы между пакетами случайны. Входной поток является марковским, но время его обслуживания не подчиняется экспоненциальному распределению, т.е. анализируемый процесс обработки входных потоков содержит марковскую составляющую. Значит, данную систему можно исследовать с помощью математического аппарата полумарковских процессов [7], а функция распределения временных интервалов нахождения процесса в состоянии i будет произвольно распределенной случайной величиной [8]. Такому же распределению подчиняются промежутки между моментами окончания обслуживания и очередными моментами поступления запросов на обслуживание. Считаем также, что случайные потоки пакетов, определяемые функцией распределе-

ния Эрланга, поступают по m каналам с интенсивностями $a_i (i = \overline{1, m})$, $\lambda = \sum_{i=1}^m a_i$.

Для системы $M/G/1/n$ преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения объема обслуживаемого пакета $R(x)$:

$$l_i(s) = 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} - \frac{f}{(s+f)^2} \right].$$

Здесь $g_i > 0$ — время задержки приема пакета по i -му каналу, f — параметр распределения, s — комплексный параметр преобразования Лапласа-Стилтьеса. В данном выражении он выполняет функцию множителя в показателе экспоненты и позволяет находить моменты распределения случайной величины любой степени.

Среднее значение и дисперсия:

$$l_{1i} = \frac{2a_i}{g_i f^2} = \frac{2\rho_i}{f}, l_{2i} = \frac{2a_i}{g_i f^3} = \frac{6\rho_i}{f^2},$$

где ρ_i — загрузка входного канала, $(l_{2i} - l_{1i}^2) = \frac{2\rho_i}{f^2} (3 - 2\rho_i)$.

Тогда ПЛС объема потока пакетов:

$$\delta(s) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} + \frac{f}{(s+f)^2} \right] \right\}.$$

Средние значения и дисперсия:

$$\delta_1 = \frac{2}{f} \sum_{i=1}^m \rho_i, (\delta_2 - \delta_1^2) = \frac{2}{f^2} \sum_{i=1}^m \rho_i (3 - 2\rho_i).$$

Считаем, что вероятность потерь потока пакетов [9]:

$$\rho_{\Pi} = 1 - R(V),$$

где $R(V) = \int_0^V D(V-x) dL(x)$, $L(x) = 1 - e^{-fx}$ — функция распределения (ФР) объема потока пакетов;

$D(x) = p(\delta < x)$ — ФР суммарного объема потока пакетов δ .

Моменты ФР $R(x)$:

$$r_1 = \delta_1 + \varphi_1, r_2 = \varphi_2 + 2\varphi_1\delta_1 + \delta_2,$$

где $\varphi_1 = 1/f$ — средний объем потока пакетов; δ_1, δ_2 — моменты суммарного объема потока пакетов.

Нахождение явного вида ФР $D(x)$ не представляется возможным. В [10] показано, что при проведении расчетов эту функцию можно достаточно точно аппроксимировать выражением:

$$D(V) = p_0 + (1 - p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)}.$$

Здесь $\gamma(p, gx) = \int_0^{gx} t^{p-1} e^{-t} dt$ — неполная гамма-функция; p_0 — вероятность отсутствия запросов на обслуживание;

$\Gamma(p) = \gamma(p, \infty)$ — гамма-функция; p и g — параметры, определяемые из условия равенства соответствующих моментов объема памяти коммутатора:

$$p = \frac{r_1^2}{r_2 - r_1^2}, \quad g = \frac{r_1}{r_2 - r_1^2}.$$

Числовые значения ФР $D(x)$ получены путем имитационного моделирования с использованием стандартных численных методов, которые позволили свести решение задачи к выполнению конечного количества арифметических действий. Итоги имитационного моделирования практически совпадают с результатами аналитического моделирования, описанного в данной статье, что говорит о достоверности разработанной модели.

При формировании сетевых потоков выполняются перечисленные ниже действия [11].

1. Идентификация потока пакетов трафика.
2. Определение принадлежности пакета к формируемому потоку.
3. Формирование сетевых потоков пакетов или передача неидентифицированного пакета управляющему контроллеру.

Функция распределения времени обслуживания входного потока пакетов $B(t) = p + (1 - p)(1 - e^{-pt})$, а ее ПЛС [12]:

$$\beta(q) = p + \frac{(1 - p)p}{p + g} = \frac{p(1 + q)}{p + g}.$$

Среднее значение времени обслуживания:

$$\beta_1 = -\beta'(0) = \frac{1 - p}{p}.$$

Если загрузка системы $\rho = a\beta_1 = a(1 - p)/p$, то ПЛС времени ожидания обслуживания:

$$W(q) = \frac{(1 - \rho)(p + q)}{p + q - a(1 - p)} = \frac{(1 - \rho)(p + q)}{q + p(1 - \rho)}.$$

Тогда среднее значение времени ожидания: $W_1 = -W'(0) = \frac{\rho}{p(1 - \rho)}$.

Изображение имеет вид рациональной дроби $(A_n(p))/(B_n(p))$. P_1, P_2, \dots, P_n — корни кратности r_1, r_2, \dots, r_n , причем $r_1 + r_2 + \dots + r_n = m$ и $B_m(p) = \beta_0 (p - P_1)^{r_1} (p - P_2)^{r_2} \dots (p - P_n)^{r_n}$. Значит, оригинал можно найти по формуле [13]:

$$f(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{A_n(p) e^{pt}}{B_m(p)} \right].$$

При простых корнях знаменателя P_1, P_2, \dots, P_n :

$$f(t) = \sum \frac{A_n(P_k)}{B_m(P_k)} e^{P_k t}.$$

Обращение ПЛС функции $W(q)$ определяется соотношением:

$$W(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{(1 - \rho)(p + q)}{q(q + p(1 - \rho))} e^{qt} \right].$$

Функция распределения случайной величины V имеет вид:

$$V(t) = p \{V < t\} = \int_0^t W(t - u) dU = 1 - e^{-(1 - \rho)\mu t}.$$

Для случая $p \{W > 0\} = 1 - W(0) = \frac{(n\rho)^n p_0}{n!(1 - \rho)}$ среднее значение стационарного времени ожидания:

$$W_1 = EW = \int_0^\infty dW(t) = \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu (1 - \rho)^2 (n - 1)!}.$$

Среднее значение стационарного времени обслуживания:

$$V_1 = EV = \int_0^{\infty} t dV(t) = \beta_1 + T_1 = \frac{1}{\mu} + \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu (1-\rho)^2 (n-1)!}.$$

Данные случайные величины аппроксимированы ФР $Z(x) = p_0 + (1-p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)}$. Здесь $\gamma(p, gx) = \int_0^{gx} t^{p-1} e^{-t} dt$,

$\Gamma(p) = \gamma(p, \infty)$, p_0 — стационарная вероятность отсутствия требований:

$$p = \frac{\delta_1^2}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}, \quad g = \frac{(1-p_0)\delta_1}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}.$$

Очевидно, что фазы передачи выходящих из коммутатора сетевых пакетов можно описать графом (рис. 3) [14].

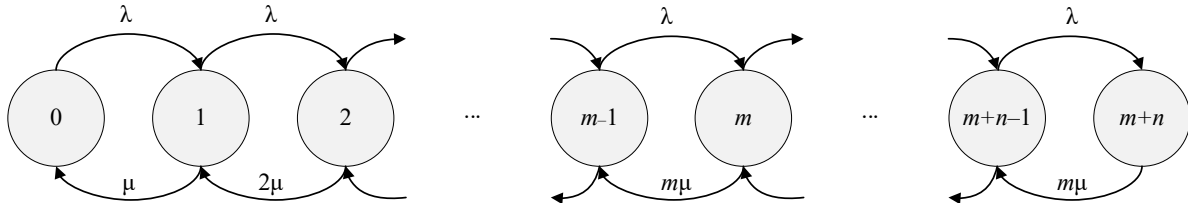


Рис. 3. Граф состояний и переходов СМО типа $M/M/m/n$

Из [15] известна вероятность нахождения системы $M/M/m/n$ в состоянии p_k :

$$p_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}}, \quad 0 \leq k \leq m.$$

Здесь $\rho = \lambda/\mu$ — нагрузка.

Соответственно, вероятность состояния p_{m+s} :

$$p_{m+s} = \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^s}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}}, \quad 0 \leq s \leq n.$$

Тогда интенсивность выходного потока: $y = \lambda - \lambda p_{m+n} = \lambda \sum_{i=0}^{m+n-1} p_i$.

$$p_0 = \frac{\rho}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}},$$

$$p_{m+n} = \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}} = \frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n p_0.$$

Согласно [16], с учетом потерянных пакетов интенсивность выходного потока:

$$y = \lambda(1 - p_{m+n}) = \lambda \left(1 - \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\rho} p_0 \right) = \lambda \frac{\rho - \frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\rho} p_0.$$

Время пребывания пакетов в системе:

$$V = \frac{N}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Время ожидания пакетов в очереди:

$$W = \frac{N_0}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Время обслуживания:

$$T_{об} = V - W = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)} - \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)} = \frac{1}{m\mu} + \frac{(m-1)\sum_{k=m}^{m+n} p_k + \sum_{k=2}^{m-1} (k-1)p_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Представленные выражения дают возможность получить основные характеристики коммутатора OpenFlow. В этом случае принимаются во внимание обработка и управление потоками пакетов, а также взаимодействие с центральным сетевым контроллером. При этом буферная память считается общим, динамически распределяемым ресурсом и определяется с учетом ограничений на долю потерянных пакетов при заданной вероятности потерь. Допустимые ограничения модели:

- произвольное распределение зависимости между объемом потоков данных и временем их обслуживания;
- предполагаемая дискретность распределения структуры информационных потоков.

Результаты исследования. Итак, в рамках данного исследования разработана модель коммутатора OpenFlow для расчета и оценки его буферной памяти. С использованием математического аппарата полумарковских процессов и преобразований Лапласа-Стилтьеса задаются:

- вероятность потери потоков пакетов;
- их статистические характеристики;
- пропускная способность вычислительных устройств.

Обработка потоков пакетов состоит из множества независимых последовательных фаз, и время обслуживания на них распределено экспоненциально. Поэтому в основу предлагаемой модели положена процедура многофазного обслуживания, при которой время обслуживания определяется распределением Эрланга n -го порядка, а моменты функций распределения находятся преобразованием Лапласа-Стилтьеса.

В таблицах 1, 2 представлены результаты аналитического моделирования объема буферной памяти коммутатора и зависимости среднего времени ожидания обслуживания от загрузки. В данном случае она увеличивается от 0,1 до 0,9. Объем памяти коммутатора измеряется числом средних объемов входных потоков пакетов.

Таблица 1

Зависимость объема буферной памяти от загрузки коммутатора

Вероятность потери, p_n	Загрузка буферной памяти коммутатора, ρ								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10^{-3}	0,201	0,307	0,412	0,478	0,617	37,05	69,07	94,36	178,87
10^{-4}	0,403	0,481	0,521	0,680	2,15	4,31	21,05	232,7	831,3
10^{-5}	0,762	0,790	0,840	0,932	3,76	7,83	16,07	476,5	983,2
10^{-6}	0,937	0,951	1,511	1,79	5,07	16,08	87,13	748,1	10564

Таблица 2

Зависимость среднего времени ожидания от загрузки коммутатора, мс

Вероятность потери, p_n	Загрузка буферной памяти коммутатора, ρ								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10^{-4}	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,17	30	120	470
10^{-4}	0,00*	0,00*	0,01*	0,04*	0,12*	0,53*	90*	510*	2300*

Примечание: * Помечены результаты имитационного моделирования коммутатора.

Результаты имитационного моделирования получены при использовании самоподобного сетевого трафика, описываемого распределением Парето с параметром 1,5. Если загрузка системы менее 50 %, то полученные при имитационном моделировании характеристики для системы $P/G/1$ незначительно отклоняются от средних показателей, полученных при аналитическом моделировании. При загрузке более 50 % значения увеличиваются в нескольких раз. Показатели резко возрастают с загрузкой коммутатора до 70 % и кратно увеличиваются, если этот уровень превышает.

Обсуждение. Результаты данной научной работы получены при условии независимости функции распределения интенсивности потока пакетов от обрабатываемой их фазы, а также постоянного характера объема потока пакетов. Только в этом случае будет справедлив итог преобразования Лапласа-Стилтьеса для объема памяти коммутатора.

Основной недостаток результатов заключается в том, что полученные оценки достоверны только на уровне частных распределений. Модель сетевого коммутатора OpenFlow построена в предположении использования общей динамически распределяемой буферной памяти, а рассматриваемые фазы обработки потоков заявок считаются независимыми, поэтому итоги исследования можно использовать только при равенстве времени:

- ввода потока пакетов в память коммутатора;
- его вывода в канал связи.

Такие условия следует считать допустимыми, учитывая возможности современных средств обработки и передачи данных.

Результаты моделирования, приведенные в таблицах 1 и 2, получены с учетом заданных характеристик потерь и текущей сетевой загрузки. При невысокой загрузке очереди не переполняются, пакеты не теряются, сохраняются линейные зависимости. При средней, а тем более высокой загрузке процессы обработки сетевых потоков пакетов описываются уже нелинейными зависимостями. Причина расхождения результатов аналитического и имитационного моделирования — взрывообразный характер самоподобного сетевого трафика и достаточно приближенный характер его описания распределением Парето.

Очевидно, что целесообразность применения предложенной модели определяется текущей загруженностью коммутатора. Данную модель можно использовать в проектировании сетевых элементов программно конфигурируемых сетей для анализа их устойчивости при различных информационных воздействиях.

Итоги представленного исследования при загрузке до 50 % практически совпадают с результатами, полученными в рамках классических методов теории массового обслуживания [5]. Критические потери входных потоков пакетов начинаются при загрузке коммутатора 50 %. Дальнейшее увеличение загрузки не предусматривается, следовательно, не оцениваются ни поведение, ни устойчивость системы при более высокой загрузке.

Уровень работоспособности предложенной модели соответствует известным результатам имитационного моделирования с использованием самоподобного сетевого трафика, описываемым распределением Парето.

Заключение

1. Построена аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN, предназначенная для определения:

- средних значений и дисперсии общего объема буферной памяти коммутатора;
- объемов памяти для построения таблиц потоков адресации.

2. Получены аналитические выражения для определения следующих характеристик качества обслуживания коммутатора программно конфигурируемой сети:

- интенсивность выходного потока пакетов с учетом потерь;
- время пребывания пакетов в системе;
- время ожидания пакетов в очереди;
- время обслуживания;
- зависимость объема буферной памяти и среднего времени ожидания обслуживания от загрузки.

3. Работоспособность модели подтверждено сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования при изменении загрузки коммутатора от 0,1 до 0,9.

4. Модель позволяет без использования физического оборудования тестировать сети SDN для обоснования параметров коммутатора с учетом его окружения.

Предполагается, что следующая статья, посвященная разработке модели функционирования коммутатора SDN, будет учитывать потоки заявок как из внешней сети, так и от управляющего контроллера (сервера).

Список литературы / References

1. Самуйлов К.Е., Шалимов И.А., Бужин И.Г., Миронов Ю.Б. Модель функционирования телекоммуникационного оборудования программно конфигурируемых сетей. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2018;14(1):13–26. <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.013-026>

Samouylov KE, Shalimov IA, Buzhin IG, Mironov YuB. Model of Functioning of Telecommunication Equipment for Software-Configured Networks. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018;14(1):13–26. <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.013-026>

2. Ivanova D, Adou Y, Markova E, Gaidamaka Yu, Samouylov K. Mathematical Framework for Mixed Reservation- and Priority-Based Traffic Coexistence in 5G NR Systems. *Mathematics*. 2023;11(4):1046. <https://doi.org/10.3390/math11041046>
3. Баскаков А.Е., Волков А.С. Алгоритм управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети связи. *Труды МАИ*. 2020;(115). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-06>
- Baskakov AE, Volkov AS. Resources Managing Algorithm for Transport Software-Defined Communication Network *Труды МАИ*. 2020;(115). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-06>
4. Stepanov MS, Stepanov SN, Kanischeva MG, Kroshin FS. Analysis of Procedures to Ensure the Required QoS Indicators in Multiservice Access Nodes. В: *Мат-лы XXVI Междунар. науч. конф. «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2023)»*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; 2023. Вып. 1. С. 47–55. <https://doi.org/10.25728/dccn.2023.007>
- Stepanov MS, Stepanov SN, Kanischeva MG, Kroshin FS. Analysis of Procedures to Ensure the Required QoS Indicators in Multiservice Access Nodes. In: *Proceedings of the XXVI International Conference. on “Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN)”*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences; 2023. Iss. 1. P. 47–55.
5. Mochalov VP, Linets GI, Bratchenko NY, Govorova SV. An Analytical Model of a Corporate Software-Controlled Network Switch. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2020;21(2):337–346. <https://doi.org/10.12694/scpe.v21i2.1698>
6. Малахов С.В., Якупов Д.О., Осипова А.А., Копылова Д.А., Зеленина Е.А. Применение системы массового обслуживания для исследования характеристик канала связи в IoT-сетях. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2024;22(1):49–61. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61>
- Malakhov SV, Yakupov DO, Osipova AA, Kopylova DA, Zelenina EA. The Use of a Queuing System to Study the Characteristics of the Communication Channel in IoT Networks. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2024;22(1):49–61. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61>
7. Tikhonenko OM. Generalized Erlang Problem for Service Systems with Finite Total Capacity. *Communication Network Theory*. 2005;41:243–253. <https://doi.org/10.1007/s11122-005-0029-z>
8. Антонова П.В. Принципы разработки систем массового обслуживания с ограниченной очередью на платформе NET. *Программные системы и вычислительные методы*. 2023;(2):15–28. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2023.2.43403>
- Antonova PV. Principles of Developing a Limited-Queue Mass Service System on the .NET Platform. *Software Systems and Computational Methods*. 2023;(2):15–28. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2023.2.43403>
9. Voronova AG. Typification of Projects for the Transition to Cloud Services. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):274–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282>
10. Gorbunova AV, Lebedev AB. On Estimating the Characteristics of a Fork-Join Queueing System with Poisson Input and Exponential Service Times. *Advances in Systems Science and Applications*. 2023;23(2):99–114. <https://doi.org/10.25728/assa.2023.23.2.1351>
11. Мочалов В.П., Братченко Н.Ю., Моисеенко В.А., Гостева Д.В. *Имитационная модель алгоритмов функционирования узлов будущих сетей связи*. RU2019618220. Государственная регистрация программы для ЭВМ. 2019. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Бюл. № 7. URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019618220&TypeFile=html (дата обращения: 09.06.2026).
- Mochalov VP, Bratchenko NYu, Moiseenko VA, Gosteva DV. *A Simulation Model of Algorithms for the Operation of Nodes of Future Communication Networks*. Certificate of Software State Registration no. 2019618220, 2019. (In Russ.) URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019618220&TypeFile=html (accessed: 09.06.2026.)
12. Topilin IV, Han M, Feofilova AA, Beskopylny NA. Comparative Analysis of Neural Network and Machine Learning Models for Short-Term Traffic Flow Prediction on Shenzhen Expressway. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):350–362. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2215>
13. Горбунова А.В. Об особенностях управления скоростью обслуживания в fork-join системах с распределением Парето времени обслуживания. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2025;(4):53–62. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/53-62>
- Gorbunova AV. On the Features of Service Speed Control in Fork-Join Systems with Pareto Distribution of Service Time. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2025;(4):53–62. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/53-62>
14. Dudin SA, Dudin AN, Dudina OS, Chakravarthy SR. Analysis of a Tandem Queueing System with Blocking and Group Service in the Second Node. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*. 2023;10(1):2235270. <https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2235270>
15. Samoilenko VV. Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):371–382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>

16. Горбунова А.В., Лебедев А.В. Об особенностях управления скоростью обслуживания в системах с разделением и параллельным обслуживанием заявок. *Автоматика и телемеханика*. 2024;12:70–88. <https://doi.org/10.31857/S0005231024120048>

Gorbunova AV, Lebedev AV. On the Features of Service Rate Control in Fork-Join Queueing System. *Automation and Remote Control*. 2024;85(12):70–88. <https://doi.org/10.31857/S0005231024120048>

Об авторах:

Геннадий Васильевич Слюсарев, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник департамента науки, профессор департамента «Строительная инженерия и прототипирование» института перспективной инженерии Северо-Кавказского федерального университета (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), gslusarev@ncfu.ru

Валерий Петрович Мочалов, доктор технических наук, профессор департамента «Цифровые, робототехнические системы и электроника» института перспективной инженерии Северо-Кавказского федерального университета (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), mochalov.valery2015@yandex.ru

Дарья Валерьевна Гостева, программист, Северо-Кавказский федеральный университет (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, проспект Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), DVGus@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.В. Слюсарев: разработка концепции.

В.П. Мочалов: административное руководство исследовательским проектом, написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Д.В. Гостева: разработка программного обеспечения.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Gennady V. Slyusarev, Dr.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Science, Professor of the Department of Civil Engineering and Prototyping, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), gslusarev@ncfu.ru

Valery P. Mochalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), mochalov.valery2015@yandex.ru

Dar'ya V. Gosteva, programmer, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), DVGus@yandex.ru

Claimed Contributorship:

GV Slyusarev: conceptualization.

VP Mochalov: project administration, writing – review & editing.

DV Gosteva: software.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.04.2026

Принята к публикации / Accepted 17.05.2026