



# АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАЯВКИ В КОММУТАТОРЕ ПКС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ OPENFLOW

**М. А. Буранова\*, В. Г. Карташевский**

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
г. Самара, 443010, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: [mburanova@yandex.ru](mailto:mburanova@yandex.ru)

**Аннотация**—Анализ параметров функционирования программно-конфигурируемых сетей является весьма актуальным. Существует множество подходов с использованием методов теории массового обслуживания по оценке параметров качества обработки в системе  $G/G/1$ . На данном этапе развития инфокоммуникационных сетей актуальной является разработка аналитических моделей, позволяющих оценить параметры качества обслуживания трафика в программно-конфигурируемых сетях.

В работе получены аналитические выражения, позволяющие оценить среднее время ожидания заявки в коммутаторе ПКС при использовании математического аппарата теории массового обслуживания на основе анализа состояния накопителя. При этом предполагается, что случайные интервалы времени между поступающими заявками имеют гиперэкспоненциальное распределение. В качестве модели системы была использована модель типа  $H2/G/1/\infty$ . Смесь экспоненциальных распределений позволяет учесть фрактальные свойства последовательности случайных интервалов времени между поступающими заявками, то есть «тяжелый хвост» исходного моделируемого распределения и корреляционные свойства рассматриваемых интервалов времени.

В работе приведено сравнение результатов вычисления времени ожидания заявки в накопителе для системы  $H2/G/1/\infty$  с результатом для системы  $G/G/1/\infty$ , которая аппроксимирована моделью очереди типа  $P/W/1/\infty$ , где оценивание среднего времени ожидания заявки в очереди осуществлялось на основе решения уравнения Линдли спектральным методом. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются.

**Ключевые слова**—программно-конфигурируемая сеть, качество обслуживания, гиперэкспоненциальное распределение, среднее время ожидания заявки в системе.

## Информация о статье

УДК 621.391.

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 14.03.2022, принята к печати 01.06.2022.

**Для цитирования:** Буранова М. А., Карташевский В. Г. Анализ времени задержки заявки в коммутаторе ПКС с использованием технологии OpenFlow // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 1. С. 9–20. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-1-9-20.



# ANALYSIS OF THE CALL DELAY TIME IN A PCS SWITCH USING OPENFLOW TECHNOLOGY

**M. Buranova\* , V. Kartashevskiy**

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,  
Samara, 443010, Russian Federation

\*Corresponding author: [mburanova@yandex.ru](mailto:mburanova@yandex.ru)

**Abstract**—Analysis of the parameters of the functioning of software-defined networks is very relevant. There are many approaches using the methods of queuing theory to evaluate the processing quality parameters in the G/G/1 system. At this stage of development of infocommunication networks, it is required to develop analytical models that allow assessing the parameters of the quality of service for traffic in software-defined networks.

In the paper, analytical expressions are obtained that allow estimating the average waiting time for a request in the SDN switch using the mathematical apparatus of the queuing theory based on the analysis of the drive. In this case, random time intervals between incoming requests have a hyperexponential distribution. A queuing system of the H2/G/1/∞ type was used as a model. A mixture of exponential distributions makes it possible to take into account the fractal properties of the sequence of random time intervals between incoming requests, the “heavy tail” of the initial simulated distribution, and the correlation properties of the considered time intervals.

The paper compares the results of calculating the waiting time of a claim in the storage for the H2/G/1/∞ system with the result for the G/G/1/∞ system, which is approximated by a queue model of the P/W/1/∞ type, where the average waiting time is estimated applications in the queue were carried out on the basis of solving the Lindley equation by the spectral method. It is shown that the obtained results are consistent.

**Keywords**—software-defined network, quality of service, hyperexponential distribution, average time of a request in the system.

## Article info

Article in Russia.

Received 14.03.2022, accepted 01.06.2022.

**For citation:** Buranova M., Kartashevskiy V.: Analysis of the call delay time in a PCS switch using OpenFlow technology // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 1. pp. 9–20. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-1-9-20.



Программно-конфигурируемые сети (ПКС) – бурно развивающаяся современная технология построения телекоммуникационных сетей, используемая в сетях связи пятого поколения 5G/IMT – 2020. Сети 5G должны реализовывать большое количество новых приложений, генерирующих очень большие потоки трафика клиентами, подключенными к Интернету, поэтому сети 5G будут конвергентными по отношению к различным технологиям.

В Плате мероприятий правительственной комиссии по использованию информационных технологий, утвержденном ещё в 2017 г.<sup>1</sup>, говорится, что «переход к ПКС с виртуализацией сетевых функций является не только актуальным, но и естественным, так как при повсеместном внедрении решений Интернета вещей (*Internet of Things, IoT*), приложений искусственного интеллекта, обработки больших данных, использовании блокчейн-методов возникают новые задачи по надежному и безопасному переносу трафика с необходимым качеством. Различные требования к задержкам и другим характеристикам функционирования, предъявляемые различными прикладными решениями и приложениями, от обычного Интернета до тактильного IoT и M2M, реализуемые на базе фиксированных сетей и сетей 5G/6G, приводят к облачной иерархии cloud/fog/edge с виртуализацией функций на разных ее уровнях и с программным конфигурированием ресурсов».

При этом трафик современных сетей не описывается традиционными (пуассоновскими, эрланговскими) моделями, основанными на предположении независимости вероятностно-временных характеристик процессов, порождающих трафик. Анализ характеристик обработки трафика, среди которых основной является время задержки сообщения в сетевом устройстве, реализованном на основе использования технологии ПКС, требует учёта фрактальных свойств случайных временных последовательностей, описывающих трафик, т. е. наличия распределений с «тяжелыми хвостами» и корреляции между элементами указанных последовательностей.

Рассмотрим упрощенную схему обработки потока заявок (пакетов) в узле ПКС, использующем технологию Open Flow<sup>2</sup>, представленную на рис. 1, где введены следующие обозначения:

$\mu_c$  – интенсивность обработки заявок в контроллере,

$\mu_s$  – интенсивность обработки заявок коммутаторе,

$\mu_j$  – интенсивность обработки заявок  $j$ -ой таблице пересылки коммутатора,

$q$  – вероятность обработки заявки в контроллере,

$\lambda_i$  – интенсивность поступления заявок  $i$ -го потока на коммутатор.

Процесс обслуживания потока заявок по данной упрощенной схеме можно описать следующим образом.

<sup>1</sup> Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Утвержден Президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам 24 декабря 2018 г.

<sup>2</sup> Open Networkin Foundation, «OpenFlow Switch Specification» Version 1.5.1, ONF TS-025.

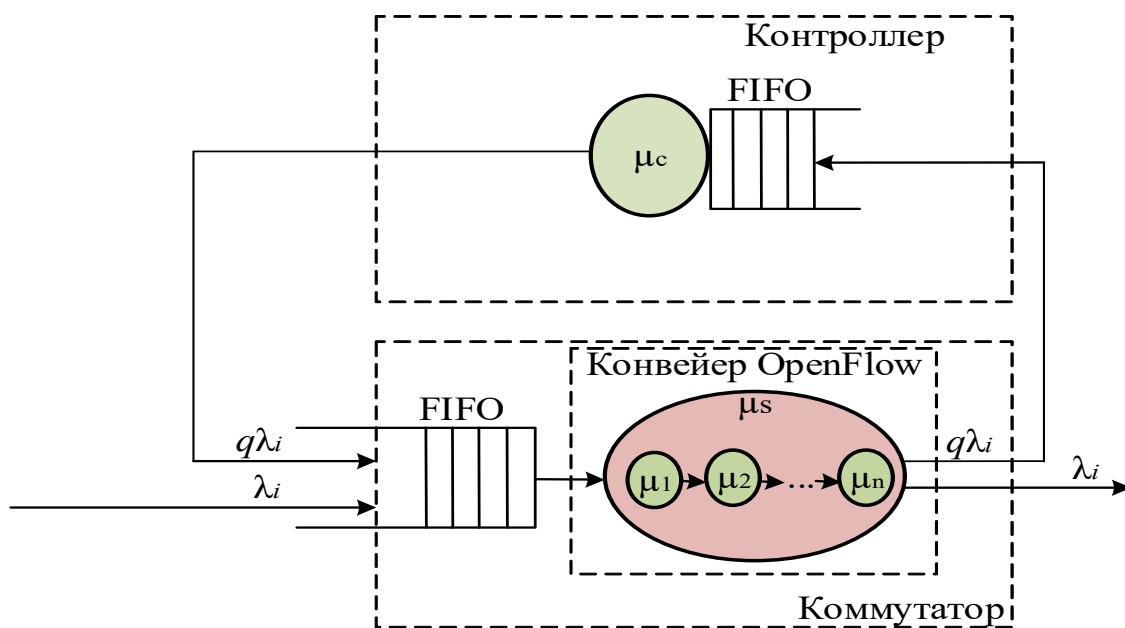


Рис. 1. Процедура обработки заявки в ПКС

Заявка, поступившая на коммутатор с вероятностью  $(1 - q)$  обрабатывается в логическом коммутаторе OpenFlow, который содержит одну или несколько (всего  $J$ ) таблиц пересылки. При этом заявки поступают на контроллер с интенсивностью  $\lambda_i$ . Порядок обработки заявок в коммутаторе определяется конвейерной обработкой OpenFlow. Сопоставление начинается с первой таблицы и продолжается до момента нахождения соответствия записи обрабатываемой заявке. Заявки обрабатываются в каждой  $j$ -й таблице с интенсивностью  $\mu_j$ .

Данные о заявке сопоставляются с записями потоков в таблицах, при этом используется первая совпадающая запись в каждой таблице. При нахождении совпадающей записи для заявки, выполняются действия, которые определяются правилами обработки, связанными с конкретной записью потока. Если правил обработки (совпадений) во всех  $J$  таблицах не найдено, запрос о правиле обработки данной заявки может быть перенаправлен с вероятностью  $q$  контроллеру по каналу OpenFlow. В контроллере определяется правило обработки потока, которому принадлежит заявка. Интенсивность обработки в контроллере определяется как  $\mu_c$ . Затем по каналу OpenFlow передаются данные таблиц потоков для исправления в коммутаторе. А заявка обрабатывается в стандартном режиме, например, отправляется на определенный выходной интерфейс. Интенсивность обработки в коммутаторе OpenFlow  $\mu_s$ .

Сосредоточим своё внимание на анализе работы коммутатора, который будем моделировать системой массового обслуживания типа  $M_2/G/1/\infty$ .

Выбор такой модели не случаен. В работах авторов [1, 2, 3, 4] показано, что гиперэкспоненциальное распределение  $M_2$ :

$$f(x) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 x} + (1 - p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 x}, \quad (1)$$



представляющее смесь двух показательных (экспоненциальных) распределений позволяет учесть фрактальные свойства последовательности случайных интервалов времени между поступающими заявками, а именно, «тяжелый хвост» исходного моделируемого распределения и корреляционные свойства рассматриваемых интервалов времени.

Если исходное распределение не имеет «тяжелого хвоста», то определение трех параметров в (1)  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $p$  осуществляется, как показано, например, в [5], на основе приравнивания трех моментов исходного распределения и распределения  $H_2$ , или трех параметров – среднего значения, дисперсии и коэффициента вариации.

В случае «тяжелого хвоста» исходного распределения определение параметров гиперэкспоненциального распределения порядка  $K$ , т. е. вида  $H_K$ , может быть получено на основе метода «рекурсивного подбора» интервалов, на которых реализуется расчет параметров гиперэкспоненциального распределения, как это показано в работах [1, 3].

Учёт корреляционных свойств временной последовательности интервалов между поступающими заявками может быть осуществлен в модели  $H_2$  путем введения в рассмотрение эквивалентной временной последовательности с некоррелированными значениями, параметры модельного распределения  $H_2$  которой рассчитываются по индексу дисперсии, учитывающему полный набор значимых коэффициентов корреляции исходной последовательности [6].

Ещё одним (пожалуй, более универсальным) способом определения параметров гиперэкспоненциального распределения  $H_2$  является способ, основанный на применении алгоритма EM [4], который на основе итеративной вычислительной процедуры анализа зарегистрированной последовательности временных интервалов трафиковой последовательности позволяет сформировать оценки максимального правдоподобия параметров распределения  $H_2$ . При этом необходима предварительная регистрация коэффициента корреляции соседних элементов в последовательности временных интервалов. Использование данного алгоритма позволяет получить оценки параметров модельного распределения  $H_2$ , «автоматически» учитывающие свойства реально наблюдаемого одномерного распределения последовательности временных интервалов и корреляционные связи элементов обрабатываемой последовательности. Можно показать, что в данном случае учет коэффициента корреляции соседних элементов последовательности аналогичен учёту индекса дисперсии в работах [6].

Расчет времени задержки пакета в коммутаторе проведем на основе анализа состояния накопителя [7, 8] согласно диаграмме, показанной на рис. 2.

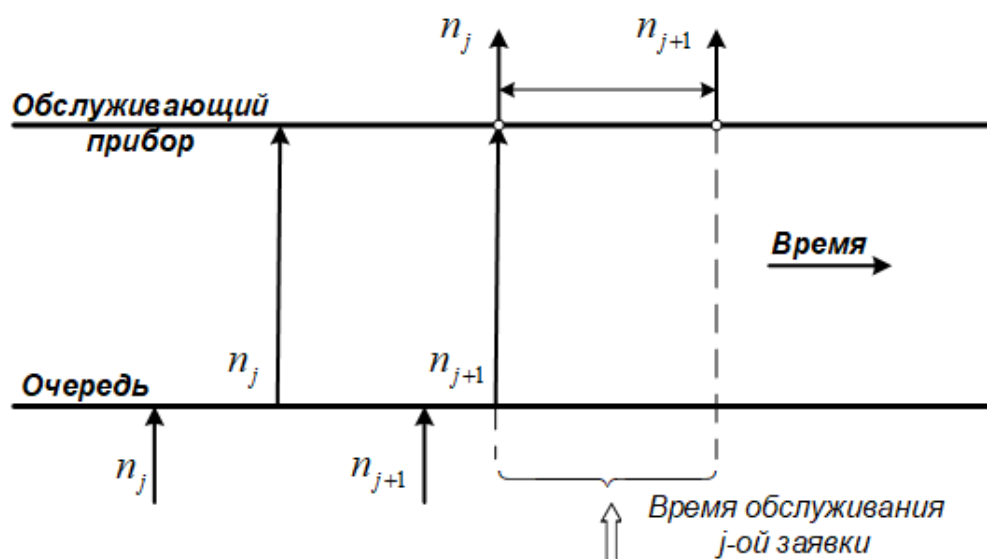


Рис. 2. Диаграмма состояния накопителя

Положим, что  $n_j$  – число заявок, находящихся в системе (накопитель + обслуживающее устройство), если  $j$ -я заявка покинула систему,  $v_j$  – число заявок, поступающих за время обслуживания  $j$ -й заявки. Вводя обозначение

$$\begin{cases} a^+ = a & \text{при } a \geq 0 \\ a^+ = 0 & \text{при } a < 0, \end{cases}'$$

запишем уравнение, определяющее характер изменения состояния накопителя во времени

$$n_j = (n_{j-1} - 1)^+ + v_j. \quad (2)$$

Учитывая, что  $n_j$  и  $v_j$  – независимые случайные величины, воспользуемся аппаратом производящих функций для вычисления плотности вероятностей случайной величины  $n_j$ .

Определяя производящую функцию случайной величины  $n$  как:

$$G_n(z) \equiv E(z^n) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k, \quad (3)$$

где  $E$  – символ усреднения,  $z$  – произвольное комплексное число, при котором сумма в (3) сходится, а  $P_k = P(n = k)$ , для производящей функции случайной величины  $n_j$  запишем:



$$G_{n_j}(z) = G_{a^+}(z) \cdot G_{v_j}(z). \quad (4)$$

Здесь под величиной  $a^+$  подразумевается  $(n_{j-1} - 1)^+$ .

Если предположить, что функция распределения величины  $v_j$  известна (в рассматриваемой постановке это – гиперэкспоненциальное распределение), то всегда можно найти  $G_{v_j}(z)$ , и при стационарном режиме работы устройства индекс  $j$  можно опустить.

Используя результаты работы [7, 8], можно получить для  $G_{a^+}(z)$ :

$$G_{a^+}(z) = P_0 + \frac{G_n(z) - P_0}{z}. \quad (5)$$

Теперь, подставляя (5) в (4) запишем:

$$G_n(z) = \frac{P_0(z-1)G_v(z)}{z - G_v(z)}, \quad (6)$$

где  $P_0$  – вероятность того, что система пуста, и определить значение  $P_0$  можно из условия  $G_n(z)|_{z=1} = 1$ .

Возникающую при использовании данного условия неопределенность в (6) типа  $\frac{0}{0}$  можно устранить, разлагая производящую функцию  $G_v(z)$  из (6) в ряд Тейлора:

$$G_v(z) = G_v(1) + \left. \frac{dG_v(z)}{dz} \right|_{z=1} \cdot (z-1) + \left. \frac{d^2G_v(z)}{dz^2} \right|_{z=1} \cdot \frac{(z-1)^2}{2!} + \dots$$

и вычисляя первую и вторую производную в данном разложении.

Напомним, что последовательное дифференцирование производящей функции  $G_v(z)$  позволяет получить соответственно первый, второй и последующие моменты случайной величины  $v$ . Выполняя данную процедуру, легко получить:

$$P_0 = 1 - E(v). \quad (7)$$

Обратим внимание, что для системы M/M/1/∞  $P_0 = 1 - \rho$ .

В случае использования гиперэкспоненциального распределения (1) коэффициент загрузки записывается в виде:



$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{[p\lambda_2 + (1-p)\lambda_1]\mu}.$$

Подставляя (7) в (6), окончательно получим для  $G_n(z)$ :

$$G_n(z) = \frac{[1 - E(v)](z-1)G_v(z)}{z - G_v(z)}. \quad (8)$$

Формула (8) в принципе даёт решение задачи по определению среднего числа заявок, находящихся в коммутаторе, т. к. согласно свойствам производящей функции:

$$E(n) = \left. \frac{dG_n(z)}{dz} \right|_{z=1}. \quad (9)$$

Для использования (8) в (9) необходимо определить аналитическое выражение производящей функции  $G_v(z)$ . Как следует из определения производящей функции, аналитическое выражение для  $G_v(z)$  можно получить, если определить  $P_k = P(v = k)$  для всех  $k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , т. е. определить вероятность поступления ровно  $k$  заявок за случайное время  $\tau$ .

Тогда для  $P(v = k)$  можно записать:

$$P(v = k) = \int_0^{\infty} P(v = k | \tau) f(\tau) d\tau, \quad (10)$$

где  $f(\tau)$  – гиперэкспоненциальное распределение (1).

Очевидно при этом:

$$P(v = k | \tau) = p \frac{(\lambda_1 \tau)^k e^{-\lambda_1 \tau}}{k!} + (1-p) \frac{(\lambda_2 \tau)^k e^{-\lambda_2 \tau}}{k!}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10) и далее в формулу для определения порождающей функции, можно получить:

$$G_v(z) = pF(\lambda_1(1-z)) + (1-p)F(\lambda_2(1-z)), \quad (12)$$

где  $F(\cdot)$  – преобразование Лапласа показательного распределения, и далее, с учётом свойств порождающей функции:





$$E(v) = p\lambda_1 E(\tau) + (1-p)\lambda_2 E(\tau) = [p\lambda_1 + (1-p)\lambda_2] E(\tau). \quad (13)$$

Полученные характеристики случайной величины  $v$  позволяют воспользоваться формулами (9) и (8) для нахождения средней занятости системы:

$$E(n) = \left. \frac{dG_n(z)}{dz} \right|_{z=1} = \frac{1}{2(1-\rho)} [\sigma_v^2 + \rho(1-\rho)], \quad (14)$$

где  $\sigma_v^2 = E(v^2) - E^2(v)$  – дисперсия случайной величины  $v$ .

Вычисляя дисперсию гиперэкспоненциального распределения, получим окончательно:

$$E(n) = \frac{1}{(1-\rho)} \left( \rho + \frac{1}{2} (p\lambda_1^2 + (1-p)\lambda_2^2) \sigma_\tau^2 - \rho^2 \left( 1 - \frac{\rho}{2} \right) \right), \quad (15)$$

где  $\sigma_\tau^2$  – дисперсия распределения времени обслуживания.

Среднее время задержки заявки в системе записывается на основе формулы Литтла:

$$E(T) = \frac{E(n)}{\lambda} = \frac{1}{(1-\rho)} \left( \frac{1}{\mu} + \frac{\sigma_\tau^2 (p\lambda_1^2 + (1-p)\lambda_2^2)}{2\lambda} - \frac{\rho}{\mu} \left( 1 - \frac{\rho}{2} \right) \right), \quad (16)$$

где  $\lambda = \frac{\lambda_1\lambda_2}{p\lambda_2 + (1-p)\lambda_1}$ ,  $\frac{1}{\mu}$  – среднее время обслуживания.

Теперь можно получить выражение для определения среднего времени ожидания  $E(W)$  заявки в накопителе системы  $M_2/G/1/\infty$ :

$$E(W) = E(T) - \frac{1}{\mu} = \frac{\rho\rho^2 + \sigma_\tau^2 (p\lambda_1^2 + (1-p)\lambda_2^2)}{2\lambda(1-\rho)}. \quad (17)$$

Сравним результат вычисления времени ожидания заявки в накопителе системы  $M_2/G/1/\infty$  по формуле (17) с аналогичным результатом для системы  $G/G/1/\infty$ , которая конкретно представлялась системой  $P/W/1/\infty$ , ( $P$  – означает распределение Парето,  $W$  – распределение Вейбулла), где определение  $E(W)$  осуществлялось на основе решения уравнения Линдли спектральным методом [9]. Распределение Парето представлялось в виде:

$$f_p(x) = \frac{\alpha\beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad \alpha > 0, \beta > 0, \quad x > 0$$



причем параметры распределения имели значения  $\alpha = 2,3$ ;  $\beta = 0,55$ , что соответствовало среднему  $m = 1,136$  и дисперсии  $\sigma^2 = 1,134$ .

Для распределения Вейбулла:

$$f_w(y) = \frac{a}{b^a} y^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{y}{b}\right)^a\right), \quad y \geq 0,$$

$a = 0,8$ ;  $b = 1,5$ , среднее  $m = 0,59$  и дисперсия  $\sigma^2 = 4,58$ .

Важно отметить, что оба распределения были аппроксимированы гиперэкспонентами  $H_2$  с параметрами  $\lambda_1 = 1,7$ ,  $\lambda_2 = 0,051$ ,  $p = 0,97$ ,  $\lambda = \lambda_{cp} = 0,88$  – для распределения Парето и с соответствующими параметрами  $\mu_1 = 2,2$ ;  $\mu_2 = 0,066$ ,  $q = 0,97$ ,  $\mu = \mu_{cp} = 1,144$  – для распределения Вейбулла. Коэффициент загрузки определяется при таких параметрах распределений как  $\rho = \frac{m_w}{m_p} = 0,515$ .

Для расчета по формуле (17) были выбраны такие же параметры аппроксимации для распределения Парето и распределение Вейбулла с такими же средним и дисперсией ( $m = 0,59$ ;  $\sigma^2 = 4,58$ ).

Используя процедуру по определению параметров гиперэкспонент, приведенную в работе [9], и метод решения уравнения Линдли, можно получить:  $E(W) = 19,04$  условных единиц времени. При расчетах по формуле (17) –  $E(W) = 16,57$  условных единиц времени. Сравнение данных результатов показывает их хорошее совпадение.

Итак, результат, полученный при анализе занятости накопителя коммутатора и основанный на методологии вывода формулы Поллячека-Хинчина, позволяет при гиперэкспоненциальной аппроксимации смесью двух экспоненциальных распределений любого распределения интервалов времени между заявками получать оценку среднего времени задержки заявки в системе  $G/G/1/\infty$ .

Этот подход целесообразно применить для анализа среднего значения времени обработки заявки в системе и в очереди коммутатора при конвейерной обработке в коммутаторе OpenFlow, которая организована таким образом, что заявки проходят через несколько таблиц пересылки (рис. 1), каждую из которых можно рассматривать как отдельный узел системы массового обслуживания.

Согласно такому представлению выражения (16) и (17) можно отнести к обработке в  $j$ -й таблице пересылки ( $j = 1 \dots J$ ). При условии обработки заявки в последней таблице пересылки, можно определить среднее значение максимального времени пребывания заявки в  $i$ -м коммутаторе как сумму  $J$  средних времен ожидания заявки в системе ( $E_j(T)$ ) т. е. как  $JE_j(T)$ .

## Выводы

В работе получена аналитическая оценка среднего времени ожидания заявки в системе  $H_2/G/1/\infty$ , которая может быть использована для программно-



конфигурируемой сети при самых общих предположениях о статистических параметрах обрабатываемого трафика.

Данный подход можно использовать для анализа среднего значения времени обработки заявки в системе и в очереди коммутатора при конвейерной обработке в коммутаторе OpenFlow.

### Литература

1. Feldmann, A.; Whitt, W. Fitting Mixtures of Exponentials to Long-Tail Distributions to Analyze Network Performance // Models Proceedings of INFOCOM '97. 1997. Vol. 3. pp. 1096–1104.
2. Whitt, W. On approximations for queues, III: mixtures of exponential distributions // AT&T Bell Laboratories Technical Journal. 1984. Vol. 63. No. 1. pp. 163–175.
3. Буранова М. А., Карташевский В. Г. Определение параметров гиперэкспоненциального распределения методом рекурсивного подбора // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю. А. Гагарина и Г. С. Титова, в 4 т., Воронеж, 28–30 сентября 2021 года. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. Т. 2. С. 43–52.
4. Буранова М. А. Карташевский И. В. Применение EM-алгоритма для аппроксимации гиперэкспонентами плотностей вероятностей коррелированного трафика // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7, №4. С. 10–17. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-4-10-17>.
5. Тарасов В. Н., Карташевский И. В. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания  $N2/N2/1$  // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3 (57). С. 92–96.
6. Balcioglu B., Jagerman D. L., Altioek T. Merging and splitting autocorrelated arrival processes and impact on queueing performance // Performance Evaluation. 2008. Vol. 65. Iss. 9. pp. 653–669.
7. Шварц М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 336 с.
8. Карташевский В. Г. Основы теории массового обслуживания: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 130 с.
9. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic // in International Conference on «InInternet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019». 2019. Vol 11660. pp. 610–620. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_53.

### References

1. Feldmann, A.; Whitt, W. Fitting Mixtures of Exponentials to Long-Tail Distributions to Analyze Network Performance // Models Proceedings of INFOCOM '97. 1997. Vol. 3. pp. 1096–1104.
2. Whitt, W. On approximations for queues, III: mixtures of exponential distributions // AT&T Bell Laboratories Technical Journal. 1984. Vol. 63. No. 1. pp. 163–175.
3. Buranova M. A., Kartashevskiy V. G. Determination of the parameters of hyperexponential distribution by the method of recursive selection // Radiolokaciya, navigaciya, svyaz': sbornik trudov XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhneskoj konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu poletov v kosmos YU. A. Gagarina i G. S. Titova, v 4 t., Voronezh, 28–30 sentyabrya 2021 goda. Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2021. T. 2. S. 43–52 (in Russian).
4. Buranova M., Kartashevskiy I. Application of EM-Algorithm for Approximation of Correlated Traffic Probabilities Density by Hyperexponents. Proceedings of Telecommunication Universities. 2021;7(4):10-17. (In Russ.) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-4-10-17>.
5. Tarasov V. N., Kartashevskij I. V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovanij v upravlyaemoj sisteme massovogo obsluzhivaniya  $N2/N2/1$  // Sistemy upravleniya i informacion-nye tekhnologii. 2014. № 3 (57). S. 92–96 (in Russian).
6. Balcioglu B., Jagerman D. L., Altioek T. Merging and splitting autocorrelated arrival processes and impact on queueing performance // Performance Evaluation. 2008. Vol. 65. Iss. 9. pp. 653–669.
7. Shvarc M. Computer communication network design and analusis / Per. s angl. M.: Radio i svyaz', 1981. 336 s.



8. Kartashevskij V. G. Osnovy teorii massovogo obsluzhivaniya: uchebnyk dlya vuzov. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 130 s. (in Russian).

9. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic // in International Conference on «InInternet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019». 2019. Vol 11660. pp. 610–620. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_53.

**Буранова Марина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры информационной безопасности Поволжского  
государственного университета телекоммуникаций  
и информатики,

[buranova-ma@psuti.ru](mailto:buranova-ma@psuti.ru)

**Buranova Marina A.**

*Candidate of engineering sciences, docent, associate  
Professor of the department of information security  
Povolzhskiy State University of Telecommunications  
and Informatics,*

[buranova-ma@psuti.ru](mailto:buranova-ma@psuti.ru)

**Карташевский Вячеслав Григорьевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой информационной безопасности  
Поволжского государственного университета  
телекоммуникаций и информатики,

[kartashevskiy-vg@psuti.ru](mailto:kartashevskiy-vg@psuti.ru)

**Kartashevskiy Vyacheslav G.**

Doctor of engineering sciences, full professor, head  
of the department of information security Povolzhskiy  
State University of Telecommunications and Informatics,

[kartashevskiy-vg@psuti.ru](mailto:kartashevskiy-vg@psuti.ru)