

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ ТРАФИКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗЛА SDN ПО ПРОТОКОЛУ OPEN FLOW

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-3-19-26

**Буранова Марина Анатольевна,**  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,  
[m.buranova@psuti.ru](mailto:m.buranova@psuti.ru)

**Карташевский Вячеслав Григорьевич,**  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия,  
[v.kartashevskiy@psuti.ru](mailto:v.kartashevskiy@psuti.ru)

**Manuscript received** 11 February 2024;  
**Accepted** 14 March 2024

**Ключевые слова:** модель очереди, SDN,  
качество обслуживания (QoS), среднее время  
обслуживания заявки в системе, корреляция  
интервалов времени, гиперэкспоненциальное  
распределение

Постоянно увеличивающиеся объёмы передаваемого трафика обусловили появление новых инфокоммуникационных технологий, которые предназначены для улучшения качественных показателей (QoS) работы сетевых узлов. Одной из таких технологий является технология использования программно-определяемых сетей (SDN), которая подразумевает разделение плоскости маршрутизации и коммутации трафиковых потоков. При этом анализ работы любого сетевого узла должен проводиться с учётом конструктивных особенностей указанного разделения и с учётом корреляционных свойств трафика (в частности, корреляции интервалов времени между поступающими на обработку пакетами), появление которых обусловлено объединением множества изменчивых ON/OFF источников, механизмами управления такими источниками, появлением новых сервисов и приложений и другими причинами, связанными с особенностями используемых протоколов. В работе дан анализ влияния корреляции интервалов времени между поступающими пакетами на работу узла программно-конфигурируемой сети, функционирующей по протоколу Open Flow. Получены аналитические выражения для расчета средних значений времени задержки пакета в узле сети и вариации этой задержки. При этом аналитическая модель узла сети описывается системой  $G/G/1$ , в которой плотности вероятностей интервалов времени между поступающими пакетами и интервалов времени обработки пакетов задаются гиперэкспоненциальными моделями, причём модель для плотности интервалов времени между пакетами учитывает корреляционные связи соседних интервалов. Дано сравнение среднего времени задержки в узле и вариации задержки при наличии и отсутствии корреляции.

#### Информация об авторах:

**Буранова Марина Анатольевна,** Профессор кафедры информационной безопасности, д.т.н., доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

**Карташевский Вячеслав Григорьевич,** Профессор кафедры информационной безопасности, д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

#### Для цитирования:

Буранова М.А., Карташевский В.Г. Анализ влияния корреляции трафика на характеристики функционирования узла SDN по протоколу Open Flow // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №3. С. 19-26.

#### For citation:

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G. (2024). Analysis of the influence of traffic correlation on the performance characteristics of an SDN node using the Open Flow protocol. *T-Comm*, vol. 18, no.3, pp. 19-26. (in Russian)



СВЯЗЬ

Введение

Цифровизация инфокоммуникационной сферы дала возможность пользователям применять технологии и сервисы, использование которых привело к глобальному росту объёмов передаваемых данных. Это потребовало разработки технологий передачи данных с высокими скоростями и с малыми задержками сообщений в сетевых узлах.

Объём мирового трансконтинентального интернет-трафика показывает постоянный рост в среднем более чем на 30% в год в течение последних пять лет [1]. Огромное количество интеллектуальных облачных приложений, которые взаимодействуют с «вещами» по различным физическим сетям и протоколам связи, способствует повышению сложности систем Интернета вещей (IoT). Разнообразие требований конечных пользователей, связанных с объёмом генерируемых данных, их разнообразием и скоростью их передачи, делает обеспечение качества обслуживания (QoS) ещё более важным и сложным в IoT. Кроме того, необходимо учесть тенденцию к росту потребностей в услугах удаленного доступа, который увеличился в последнее время (в условиях пандемии) благодаря глобальным мерам социального дистанцирования, и продолжает быть востребованным по сей день. Это требует разработки новых подходов в управлении современными сетями связи, новых подходов и методик их проектирования. В последние годы решение вопросов, связанных с управлением, направлено на его централизацию [2]. Например, в [1] показано, что современная сетевая архитектура, решая проблему централизации управления фиксированными и мобильными сетями, должна содержать центральный программный комплекс (пакетное ядро сети), основанный на масштабируемой серверной платформе. Основные исследования данной проблемы ориентированы на разработку программируемых сетей с централизованным управлением и на виртуализацию. На данном этапе развития сетей связи при внедрении программируемых сетей с централизованным управлением, как правило, имеют в виду технологию Software-defined networking (SDN, программно-определяемые сети) [3, 4].

Проблемы, возникающие на уровне поставщиков услуг из-за значительного увеличения подключенных устройств, объёмов и характера обрабатываемого трафика, различных требований пользователей и услуг (как правило, в качестве параметров, определяющих качество предоставления таких услуг, рассматривается задержка, вариация задержки, пропускная способность и т. д.), при принятии SDN в качестве новой сетевой парадигмы предполагается решить за счёт разделения плоскости маршрутизации и коммутации трафиковых потоков.

Как показано в [5-7], несмотря на преимущества в гибкости управления сетью по сравнению с традиционными сетями, SDN по-прежнему требует разработки надежных методик, позволяющих быстро получить оценки параметров качества обслуживания (QoS). В связи с этим возникает необходимость в разработке аналитической модели SDN, при этом, учитывая характер обрабатываемых потоков, требуется разработка модели для системы общего вида - G/G/1.

Часто данные задачи решаются посредством применения методов имитационного моделирования. Разработке аналитических моделей SDN посвящен ряд работ [5, 8-10], где главным образом исследуются модели с обработкой экспоненциальных потоков.

При построении аналитических моделей функционирования программно-определяемых сетей, которые учитывают параметры качества обслуживания, решение вопросов, связанных с производительностью и масштабированием, вызывает определенные трудности. Весьма распространенным вариантом, позволяющим решить проблемы анализа функционирования SDN, является вариант, основанный на использовании имитационного моделирования, что позволяет получить достаточно точные оценки параметров функционирования инфокоммуникационных сетей. Естественно, искомые оценки могут быть получены в результате проведения экспериментов на реальных сетях. Но, когда речь идёт о разработке новой сети или о реконструкции и модернизации уже функционирующей сети, необходимы исследования, проведенные на аналитических моделях с возможно более полным учётом свойств трафика, который будет обрабатываться в узлах проектируемой сети с учётом особенностей протокола, на основе которого разрабатываемая сеть будет функционировать.

Ниже рассматривается аналитическая модель узла SDN, функционирующей по протоколу Open Flow, как система G/G/1. Для анализа системы G/G/1, обрабатывающей пакетный трафик, плотности вероятностей интервалов времени между поступающими пакетами и интервалов времени обработки пакетов аппроксимируются гиперэкспоненциальной моделью, естественно с разными параметрами. Отличительной особенностью данного рассмотрения является аналитический учёт корреляции, возникающей в узле SDN между указанными потоками временных интервалов.

Модель SDN как СМО G/G/1

Аналогично подходу, показанному в [5-7], рассмотрим модель обработки пакетного трафика в SDN. Модель включает в себя анализ процесса обработки пакетов в узле SDN, который в свою очередь включает обработку поступающего потока пакетов и процедуру пересылки пакетов коммутатором и контроллером в SDN на основе протокола OpenFlow.

Как известно, процесс обработки потока пакетов в узле SDN на основе протокола OpenFlow может быть реализован по двум сценариям: первый – пересылка через коммутатор SDN без участия контроллера, второй – пересылка пакетов с анализом в контроллере. Данную процедуру можно описать в виде схемы, показанной на рисунке 1.

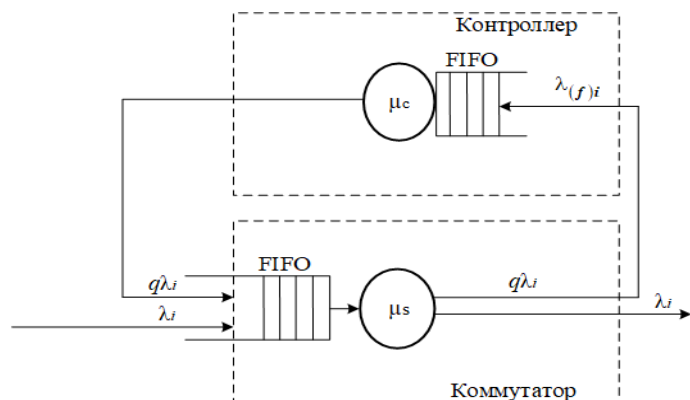


Рис. 1. Обработка входящих сообщений узлом SDN

Поскольку модель включает в себя анализ пересылки пакетов коммутатором OpenFlow на контроллер, необходимо более детально определить последовательность этапов такой обработки пакетов. Процедура пересылки потока пакетов на контроллер SDN на основе протокола OpenFlow включает следующее: каждый вновь поступающий пакет (поток) анализируется коммутатором и, если для пакета нет правила пересылки, информация о пакете (пакет-запрос) перенаправляется контроллеру для установления правил настройки обработки потока пакетов. Учитывая это, можно считать, что поступление пакетов из коммутатора в контроллер соответствует поступлению пакетов на коммутатор. В общем случае в SDN на основе протокола OpenFlow один контроллер может отвечать за несколько коммутаторов, а, следовательно, получает поток пакетов-запросов от каждого коммутатора, входящего в его зону контроля. Пакеты-запросы обслуживаются в контроллере согласно дисциплине очереди FIFO (First In – First Out).

Предположим, что поток пакетов, которые поступают на  $i$ -й коммутатор, является простейшим. Очевидно, как в работе [5], что данный поток является пуассоновским с параметром распределения  $\lambda_{(f)i}$ , на  $k$  обслуживаемых коммутаторах процессы поступления пакетов независимыми, и общий поток запросов к контроллеру является пуассоновским.

Из этого следует, что, при данном предположении, в контроллере SDN на основе протокола OpenFlow, отвечающим за  $k$  коммутаторов, процесс поступления потока пакетов от  $k$  коммутаторов соответствуют распределению Пуассона, имеющего параметр  $\lambda_{(c)}$

$$\lambda_{(c)} = \sum_{i=1}^k \lambda_{(f)i}. \quad (1)$$

Обозначим через  $W_i$  – время обработки пакета в  $i$ -ом коммутаторе. Как было показано выше, есть два возможных сценария обработки пакета: без обработки в контроллере и с обработкой в контроллере. Данный факт необходимо учесть при оценивании времени пребывания пакета в узле SDN. Во втором случае, с обработкой в контроллере, время задержки пакета будет включать в себя два этапа: обработка в коммутаторе с временем  $W_{(s)i}$ , а затем обработка в контроллере с временем  $W_{(c)}$ . Поэтому

$$W_i = \begin{cases} W_{(s)i} & \text{с вероятностью } 1 - q_i \\ W_{(s)i} + W_{(c)} & \text{с вероятностью } q_i. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая формулу (1) и схему пересылки пакетов, показанную на рисунке 1, обозначим оценку среднего времени обработки пакета в узле SDN на основе протокола OpenFlow как  $\overline{W}_i$ . Плотность вероятностей времени обработки пакета в узле SDN на основе протокола OpenFlow можно представить в виде выражения:

$$w_{(s,c)i}(u) = (1 - q_i) f_{(s)i}(u) + q_i [f_{(s)i}(u) \odot f_{(c)}(u)], \quad (3)$$

здесь  $\odot$  – символ свёртки.

Решение (3) может быть получено при известных распределениях  $f_{(s)i}(u)$  и  $f_{(c)}(u)$ .

Очевидно, если времена ожидания в коммутаторе и контроллере есть  $W_{(s)i}$  и  $W_{(c)}$  соответственно, то выражение для определения среднего времени обработки пакетов  $\overline{W}_i$  в узле SDN будет иметь вид

$$\overline{W}_i = E[W_i] = (1 - q_i) E[W_{(s)i}] + q_i (E[W_{(s)i}] + E[W_{(c)}]) \quad (4)$$

В работах [6, 7] были представлены результаты в виде аналитических выражений для получения оценок таких параметров как задержка, вариация задержки, длина очереди в узле SDN для случая, когда поступление и обработка пакетов независимы друг от друга.

### Оценивание параметров QoS в SDN на основе Open Flow для некоррелированной очереди

На основе выражения (4) рассмотрим характеристики узла SDN как системы G/G/1.

Обозначим через  $\delta_i = 1 / \overline{W}_{(s)i}$  параметр плотности распределения времени обработки в очереди в  $i$ -м коммутаторе и  $\delta_{(c)} = 1 / \overline{W}_{(c)}$  – соответствующий параметр распределения времени обработки очереди в контроллере. Определить параметры  $\delta_i = 1 / \overline{W}_{(s)i}$  и  $\delta_{(c)} = 1 / \overline{W}_{(c)}$  можно согласно методике, приведённой в [11].

В работах [6, 7] были получены результаты для случая независимости временных интервалов поступлений и обработки входящих пакетов.

Для случая, когда произвольные распределения вероятностей для времен обработки запросов в контроллере и коммутаторе аппроксимируются гиперэкспоненциальными распределениями для плотностей можно записать:

$$f_{(s)i}(u) = p \delta_{1i} e^{-\delta_{1i} u} + (1 - p) \delta_{2i} e^{-\delta_{2i} u}, \quad (5)$$

где  $p$ ,  $\delta_{1i}$ ,  $\delta_{2i}$  – параметры распределения времени обработки заявки в коммутаторе.

$$f_{(c)}(u) = g \delta_{(c)1} e^{-\delta_{(c)1} u} + (1 - g) \delta_{(c)2} e^{-\delta_{(c)2} u}, \quad (6)$$

где  $g$ ,  $\delta_{(c)1}$ ,  $\delta_{(c)2}$  – параметры плотности распределения времени обработки заявки в контроллере.

Формулы (5) и (6) означают, что система G/G/1 в данном случае аппроксимируется системой H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/1, что используется довольно часто [7, 12] и при соблюдении независимости интервалов времени внутри потоков поступления и обработки пакетов подтверждено статистическим моделированием.

Тогда из (3) для плотности вероятностей времени обработки заявки в узле SDN, моделируемым системой H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/1, можно получить

$$w_{(s,c)i}(u) = (1 - q_i) (p \delta_{1i} e^{-\delta_{1i} u} + (1 - p) \delta_{2i} e^{-\delta_{2i} u}) + q_i [(A + B) \delta_{(c)1} e^{-\delta_{(c)1} u} + (L + D) \delta_{(c)2} e^{-\delta_{(c)2} u}], \quad (7)$$

СВЯЗЬ

$$\text{где } A = \frac{pg\delta_{li}}{\delta_{li} - \delta_{(c)1}}, B = \frac{(1-p)g\delta_{2i}}{\delta_{2i} - \delta_{(c)1}}, L = \frac{p(1-g)\delta_{li}}{\delta_{li} - \delta_{(c)2}},$$

$$D = \frac{(1-p)(1-g)\delta_{2i}}{\delta_{2i} - \delta_{(c)2}}.$$

Функция плотности вероятностей согласно (7) будет иметь вид, показанный ниже на рисунке 2 сплошной линией для следующих значений:  $q_i = 0,2$ ,  $p = 0,7$ ,  $g = 0,75$ ,  $\delta_{li} = 1,9$ ,  $\delta_{2i} = 2,7$ ,  $\delta_{(c)1} = 5$ ,  $\delta_{(c)2} = 2,3$ .

Используя формулу (7), можно получить выражения для среднего времени обработки заявки  $\overline{W}_{(S,C)i}$ , средней длины очереди  $\overline{L}$  и вариации задержки  $\sigma_{(S,C)i}$  в узле программно-определяемой сети, моделируемым системой  $M_2/H_2/1$ , в следующем виде:

$$\overline{W}_{(S,C)i} = (1-q_i) \left[ \frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[ \frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right]. \quad (8)$$

$$\overline{L} = \lambda_i \left\{ (1-q_i) \left[ \frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[ \frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right] \right\}. \quad (9)$$

$$\sigma_{(S,C)i} = \sqrt{ \left[ (1-q_i) \left[ \frac{2p}{\delta_{li}^2} + \frac{2(1-p)}{\delta_{2i}^2} \right] + q_i \left[ \frac{2(A+B)}{\delta_{(c)1}^3} + \frac{2(L+D)}{\delta_{(c)2}^3} \right] \right] - \left\{ (1-q_i) \left[ \frac{p}{\delta_{li}} + \frac{(1-p)}{\delta_{2i}} \right] + q_i \left[ \frac{(A+B)}{\delta_{(c)1}} + \frac{(L+D)}{\delta_{(c)2}} \right] \right\}^2 }. \quad (10)$$

Известно [13], что повысить точность аппроксимации распределений, описывающих систему  $G/G/1$ , в случае, когда эти распределения имеют «тяжелые хвосты», можно, переходя к системе  $H_L/H_K/1$ . Если ввести обозначения

$$a_l = p_l \delta_{li},$$

$$m_k = g_k \delta_{(c)k},$$

то при использовании аппроксимации  $H_L/H_K/1$  вместо выражения (7) можно записать

$$w_{(S,C)i}(u) = (1-q_i) \sum_{l=1}^L p_l \delta_{li} e^{-\delta_{li} u} + q_i \sum_{k=1}^K \alpha_{kL}, \quad (11)$$

$$\text{где } \alpha_{kL} = m_k e^{\delta_{(c)k} u} \sum_{l=1}^L \frac{a_l}{\delta_{li} - \delta_{(c)k}}.$$

При этом формулы (8-10), соответственно, преобразуются к виду

$$\overline{W}_{(S,C)i} = (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}}, \quad (12)$$

$$\overline{L} = \lambda_i \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}} \right\}, \quad (13)$$

$$\sigma_{(S,C)i} = \sqrt{ \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{2p_l}{(\delta_{li})^2} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{2\alpha_{kL}}{(\delta_{(c)k})^3} \right\} - \left\{ (1-q_i) \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\delta_{li}} + q_i \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_{kL}}{\delta_{(c)k}} \right\}^2 }. \quad (14)$$

Оценивание параметров QoS в SDN на основе OpenFlow для коррелированной очереди

Традиционно построение моделей функционирования инфокоммуникационных сетей, в том числе и аналитических, строится на предположении о марковском характере процессов поступления и обработки пакетов в узле SDN при независимости обрабатываемых потоков, а также при отсутствии корреляций в очереди [13-15].

Существуют работы, например [5], где приведены результаты анализа параметров качества обслуживания пакетов в узле SDN с учетом того, что временные интервалы между пакетами распределены экспоненциально, а временные интервалы обработки пакетов могут иметь произвольное распределение, что соответствует модели  $M/G/1$ . В работе [5] для плотности вероятностей интервалов времени обработки использовано гауссовское распределение.

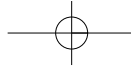
Во всех работах анализируются такие параметры качества обслуживания (QoS – Quality of Service) как задержка, вариация задержки и длина очереди. Предположение об отсутствии корреляции в очереди может привести к излишне оптимистическим результатам, которые не будут соответствовать наблюдаемым на практике в следствии того, что потоки, обрабатываемые на современных сетях связи, не являются простейшими. В них наблюдаются свойства самоподобия, а, следовательно, – наличие «тяжелых хвостов» распределений и корреляционных связей между временными последовательностями внутри процессов поступления и обработки пакетов. Данный факт подтверждается многочисленными исследованиями структуры инфокоммуникационного трафика [12, 16, 17].

Ранее в некоторых исследованиях [16, 18, 19] рассматривались модели очередей, учитывающие наличие зависимостей временных интервалов. Но данные модели построены с учетом того, что сами обслуживаемые потоки являются простейшими, интервалы обслуживания пакетов и интервалы между пакетами имеют экспоненциальное распределение, что не подтверждается современными исследованиями структур трафика [16, 17, 20-22].

Очевидно, что в аналитических моделях функционирования SDN на основе протокола OpenFlow необходимо учитывать наличие корреляций в очереди. При этом для получения адекватных моделей необходимо учесть, что случайные временные интервалы между пакетами и временные интервалы обработки пакетов имеют распределения с «тяжелыми хвостами».

Учесть корреляцию можно, например, с использованием теории копул. Такой подход представлен в работах [12, 18, 19]. Кроме теории копул для учета корреляции можно использовать подход, основанный на применении кумулянтного анализа [12, 23].

Предположим, что временные интервалы обработки пакетов в контроллере и коммутаторе коррелированы с коэффициентом корреляции  $R$ , а их плотности вероятностей записываются в виде (5) и (6). Теперь, чтобы учесть данную корреляцию, необходимо обратиться к формуле (2) и найти плотность



СВЯЗЬ

вероятностей суммы коррелированных случайных величин  $W = W_{(S)} + W_{(C)}$  с известными (гипергеометрическими) распределениями (индекс  $i$  опущен для упрощения записи).

Для решения данной задачи воспользуемся известным соотношением [23] для двумерной характеристической функции  $G_{SC}(u, v)$  коррелированных случайных величин  $W_{(S)}$  и  $W_{(C)}$

$$G_{SC}(u, v) = e^{-\theta_{11}uv} G_S(u) G_C(v) \quad (15)$$

где  $G_S(u)$  и  $G_C(v)$  – одномерные характеристические функции случайных величин  $W_{(S)}$  и  $W_{(C)}$ , корреляцию которых определяет совместный кумулянт  $\theta_{11}$ , а коэффициент корреляции записывается как  $R = \frac{\theta_{11}}{\sigma_S \sigma_C}$  ( $\sigma_S^2, \sigma_C^2$  – дисперсии соответствующих распределений).

Характеристические функции распределений (5) и (6) имеют вид

$$G_S(u) = p \frac{\delta_1}{\delta_1 - iu} + (1-p) \frac{\delta_2}{\delta_2 - iu},$$

$$G_C(v) = g \frac{\delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1} - iv} + (1-g) \frac{\delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2} - iv},$$

где  $i^2 = -1$ .

Одномерная характеристическая функция  $G(v)$  может быть получена из двумерной с использованием преобразования [22]

$$G(v) = G_{SC}(v, v) = e^{-\theta_{11}v^2} G_S(v) G_C(v), \quad (16)$$

а искомая плотность вероятностей, соответствующая функции  $G(v)$ , определится из известного соотношения

$$f_{SC}(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(v) e^{ivy} dv. \quad (17)$$

Подставляя в (16) выражения для  $G_S(u)$  и  $G_C(v)$ , легко получить

$$G(v) = e^{-\theta_{11}v^2} \left[ pg \frac{\delta_1 \delta_{(C)1}}{(\delta_1 - iv)(\delta_{(C)1} - iv)} + p(1-g) \frac{\delta_1 \delta_{(C)2}}{(\delta_1 - iv)(\delta_{(C)2} - iv)} + (1-p)g \frac{\delta_2 \delta_{(C)1}}{(\delta_2 - iv)(\delta_{(C)1} - iv)} + (1-p)(1-g) \frac{\delta_2 \delta_{(C)2}}{(\delta_2 - iv)(\delta_{(C)2} - iv)} \right].$$

Если полюса  $z_k, k = 1, 2, \dots$  функции  $G(v)$  удовлетворяют условию  $\text{Im } z_k < 0$ , а функция  $G(z) = G(v)$  удовлетворяет лемме Жордана [24], то при  $y < 0$  интеграл в (17) может быть рассчитан по формуле

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x) e^{iyx} dx = -2i\pi \sum_{k=1}^n \text{rez} \left[ G(z) e^{-iyz} \right], \quad \text{Im } z_k < 0, y < 0 \quad (18)$$

через вычисление вычетов функции  $G(z) e^{-iyz}$  во всех её особых точках при условии  $\text{Im } z_k < 0$ .

После вычисления вычетов выражение для плотности вероятностей  $f_{SC}(y)$  можно записать в виде

$$f_{SC}(y) = k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2 y} e^{-\delta_1 y} + k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2 y} e^{-\delta_2 y} + k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(C)1}^2 y} e^{-\delta_{(C)1} y} + k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(C)2}^2 y} e^{-\delta_{(C)2} y}, \quad (19)$$

где

$$k_1 = \frac{pg\delta_1\delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1}-\delta_1} + \frac{p(1-g)\delta_1\delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2}-\delta_1}, \quad k_2 = \frac{(1-p)g\delta_2\delta_{(C)1}}{\delta_{(C)1}-\delta_2} + \frac{(1-p)(1-g)\delta_2\delta_{(C)2}}{\delta_{(C)2}-\delta_2},$$

$$k_3 = \frac{pg\delta_1\delta_{(C)1}}{\delta_1-\delta_{(C)1}} + \frac{(1-p)g\delta_2\delta_{(C)1}}{\delta_2-\delta_{(C)1}}, \quad k_4 = \frac{p(1-g)\delta_1\delta_{(C)2}}{\delta_1-\delta_{(C)2}} + \frac{(1-p)(1-g)\delta_2\delta_{(C)2}}{\delta_2-\delta_{(C)2}}.$$

Теперь в случае коррелированной очереди в формуле (3) слагаемое, содержащее свёртку  $q_i [f_{(S)i}(u) \odot f_{(C)}(u)]$ , должно быть заменено выражением нормированной плотности (19), и плотность вероятностей  $w_{(S,C)i}(u)$  примет вид

$$w_{(S,C)i}(u) = (1-q) \left( p\delta_1 e^{-\delta_1 u} + (1-p)\delta_2 e^{-\delta_2 u} \right) + \frac{q}{K} \left[ k_1 e^{\theta_{11} \delta_1^2 u} e^{-\delta_1 u} + k_2 e^{\theta_{11} \delta_2^2 u} e^{-\delta_2 u} + k_3 e^{\theta_{11} \delta_{(C)1}^2 u} e^{-\delta_{(C)1} u} + k_4 e^{\theta_{11} \delta_{(C)2}^2 u} e^{-\delta_{(C)2} u} \right], \quad (20)$$

где  $K = \int_{-\infty}^{\infty} f_{SC}(y) dy$  – нормировочная константа.

Следует отметить, что одномерная плотность гиперэкспоненциально распределённых коррелированных случайных величин с коэффициентом корреляции  $R = \frac{\theta_{11}}{\sigma_S \sigma_C}$  также имеет

гиперэкспоненциальную структуру.

При различных значениях  $R$  график плотности вероятности  $w_{(S,C)}(u)$  будет иметь вид, показанный на рисунке 2. График получен с учетом сохранения ранее выбранных значений параметров распределений при  $R = 0,5, R = 0,7, R = 0,9$  и при отсутствии корреляций.

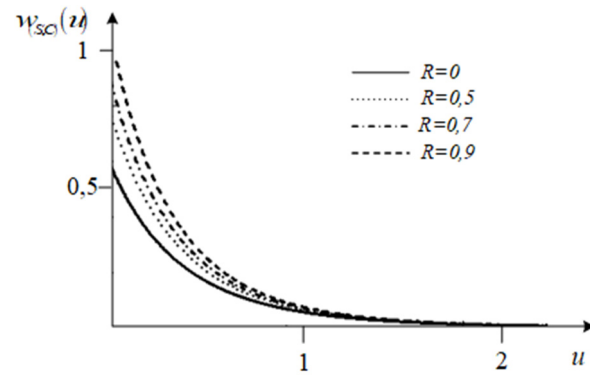
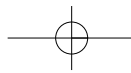


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей  $w_{(S,C)i}(u)$  при отсутствии и наличии корреляции в очереди

Для коррелированного потока выражение для определения средней задержки пакета  $\overline{W}_{(S,C)}$  будет иметь вид





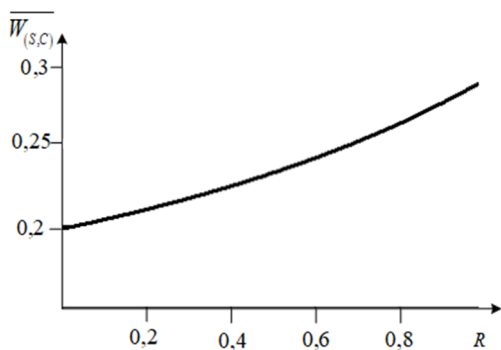
**СВЯЗЬ**

$$\overline{W}_{(s,c)} = (1-q) \left[ \frac{p}{\delta_1} + \frac{(1-p)}{\delta_2} \right] + q \left[ \frac{k_1 e^{\theta_1 \delta_1^2}}{(\delta_1)^2} + \frac{k_2 e^{\theta_1 \delta_2^2}}{(\delta_2)^2} + \frac{k_3 e^{\theta_1 \delta_{(c)1}^2}}{(\delta_{(c)1})^2} + \frac{k_4 e^{\theta_1 \delta_{(c)2}^2}}{(\delta_{(c)2})^2} \right]. \quad (21)$$

Тогда вариацию задержки с учетом корреляции можно определить в виде выражения

$$\sigma_{(s,c)} = \sqrt{\left\{ (1-q) \left[ \frac{2p}{\delta_1^2} + \frac{2(1-p)}{\delta_2^2} \right] + q \left[ \frac{2k_1 e^{\theta_1 \delta_1^2}}{(\delta_1)^3} + \frac{2k_2 e^{\theta_1 \delta_2^2}}{(\delta_2)^3} + \frac{2k_3 e^{\theta_1 \delta_{(c)1}^2}}{(\delta_{(c)1})^3} + \frac{2k_4 e^{\theta_1 \delta_{(c)2}^2}}{(\delta_{(c)2})^3} \right] \right\} - \left[ (1-q) \left[ \frac{p}{\delta_1} + \frac{(1-p)}{\delta_2} \right] + q \left[ \frac{k_1 e^{\theta_1 \delta_1^2}}{\delta_1} + \frac{k_2 e^{\theta_1 \delta_2^2}}{\delta_2} + \frac{k_3 e^{\theta_1 \delta_{(c)1}^2}}{\delta_{(c)1}} + \frac{k_4 e^{\theta_1 \delta_{(c)2}^2}}{\delta_{(c)2}} \right] \right]^2}$$

Зависимость средней задержки пакета от коэффициента корреляции  $R$  будет иметь вид, показанный на рисунке 3.



**Рис. 3.** Зависимость средней задержки пакета в SDN на основе OpenFlow согласно (21) при наличии корреляции в очереди

Анализ вариации задержки целесообразно производить численно, используя при расчетах последние две формулы при известных (или заданных) параметрах гиперэкспоненциальных распределений и коэффициенте корреляции.

Сравним вариацию задержки при наличии и отсутствии корреляции. Возьмём следующий набор параметров:  $q_i = 0,2$ ,  $p = 0,7$ ,  $g = 0,75$ ,  $\delta_{1i} = 1,9$ ,  $\delta_{2i} = 2,7$ ,  $\delta_{(c)1} = 5$ ,  $\delta_{(c)} = 2,3$ . Численные расчёты по формулам (10) и (21) при  $R = 0,7$  дают результат:  $\sigma_{(s,c)} = 0,47$ ,  $\sigma_{\text{копп}}^2 = 0,34$  (условных единиц времени).

Полученные значения позволяют сделать вывод, что при обработке коррелированных последовательностей вариация задержки ниже по сравнению со случаем, когда последовательности не коррелированы.

**Выводы**

В работе представлена аналитическая модель функционирования узла SDN с учётом возможной корреляции интервалов времени между пакетами в коммутаторе и контроллере узла SDN. Учёт корреляционных свойств произведён на основе развития модели, предложенной в [12], и основанной на использовании кумулянтного представления двумерной совместной плотности вероятностей случайных интервалов времени. Очевидно, что данный подход для моделирования совместной плотности вероятностей может быть использован для задания зависимости более «глубокой», чем корреляция,

при использовании в кумулянтном представлении характеристической функции других (кроме  $\theta_{11}$ ) совместных кумулянтов, например,  $\theta_{12}$  и  $\theta_{13}$ .

Представленный анализ показал, что появление корреляции между потоками интервалов времени входного трафика, поступающих на коммутатор и контроллер, увеличивает среднее время пребывания пакета в узле сети SDN, причем с увеличением значения коэффициента корреляции средняя задержка увеличивается почти линейно. При этом вариация задержки с появлением корреляции ожидаемо уменьшается, что физически легко объяснимо, и было отмечено ранее [12] с применением копула-функций для сетей без разделения процессов маршрутизации и передачи пакетов.

В качестве дальнейших исследований необходима разработка аналитической модели функционирования SDN на основе протокола OpenFlow, учитывающая наличие корреляционных связей внутри временных последовательностей интервалов времени между пакетами и времен обработки пакетов. Решение проблемы учета корреляций внутри потоков позволит повысить точность аналитической модели, а следовательно, позволит получить более точные прогнозы параметров, определяющих качественные показатели функционирования SDN.

**Литература**

- ITU-T Recommendations Y.3001 «Next Generation Networks – Future networks». ITU-T, Geneva, May, 2011.
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24.11.2023 № 3339-р «Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года». <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015?index=2>
- Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44-46.
- Росляков А. «Сеть-2030»: взгляд МСЭ-Т на будущее сетей фиксированной связи // Первая миля. 2021. Т. 4. № 96. С. 50-59.
- Xiong B., Yang K., Zhao J., Li W., Li K. Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model // Computer Networks. 2016. Vol. 102, pp. 174-183.
- Kartashevskiy V., Buranova M.A. OpenFlow-based software-defined networking queue model // DCCN 2021. Distributed computer and communication networks: control, computation, communications, 2021, pp. 275-280.
- Muthana A., Buranova M. Performance evaluation of software defined networking based on openflow protocol // 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2021, pp. 143-148.
- 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. Т. 14. № 1. С. 13-26.
- Muhizi S., Shamshin G., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A., Koucheryavy A. Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10372, pp. 26-37.
- Okamura H., Dohi T., Trivedi K.S. Markovian arrival process parameter estimation with group data // Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009. Vol. 17. Iss. 4, pp. 1326-1339.
- Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic // Lecture Notes in Computer Science, 2019. Vol. 11660, pp. 610-620.



12. *Карташевский И.В.* Обработка коррелированного трафика в сетях инфокоммуникаций. М.: Горячая Линия-Телеком, 2023. 199 с.

13. *Буранова М.А., Карташевский В.Г.* Рекурсивный подбор параметров гиперэкспоненциальных распределений при аппроксимации распределений с "тяжелыми хвостами" // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 40-46.

14. *Kartashevskii V.G., Buranova M.A.* Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network // 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 - Conference Proceedings. 2018, pp. 797-802.

15. *Карташевский В.Г., Буранова М.А.* Моделирование джиттера пакетов при передаче по мультисервисной сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 17. № 1. С. 34-40.

16. *Hwang G.U., Sohraby K.* Performance of correlated queues: the impact of correlated service and inter-arrival times // Performance Evaluation. 2004. No. 55, pp. 129-145.

17. *Cidon I., Guerin R., Khamisy A., Sidi M.* Analysis of a correlated queue in a communication system // IEEE Transactions on Information Theory. 1993. Vol. 39. Iss. 2, pp. 456-465.

18. *Карташевский И.В., Волков А.Н., Киричек Р.В.* Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика // Электросвязь. 2019. № 3. С. 41-50.

19. *Буранова М.А., Резяпкина М.И.* Анализ коррелированной очереди в системе G/G/1 // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 4. С. 417-427.

20. *Taggu M.S.* Self-similar processes. In S. Kotz and N. Johnson, editors, Encyclopedia of Statistical Sciences. Wiley, New York. 1988. Vol. 8, pp. 352-357.

21. *Буранова М.А.* Исследование статистических характеристик самоподобного телекоммуникационного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т.10. №4. С. 35-41.

22. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

23. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Советское радио, 1978. 376 с.

24. *Свейников А.Г., Тихонов А.Н.* Теория функции комплексной переменной: учебн.: для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 336 с.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TRAFFIC CORRELATION ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN SDN NODE USING THE OPEN FLOW PROTOCOL

**Marina A. Buranova**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, [m.buranova@psuti.ru](mailto:m.buranova@psuti.ru)

**Vyacheslav G. Kartashevskiy**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, [v.kartashevskiy@psuti.ru](mailto:v.kartashevskiy@psuti.ru)

### Abstract

The constantly increasing volumes of transmitted traffic have led to the emergence of new infocommunication technologies that are designed to improve the quality indicators (QoS) of network nodes. One of these technologies is the technology of using software-defined networks (SDN), which involves the separation of the routing plane and switching of traffic flows. In this case, the analysis of the operation of any network node should be carried out taking into account the design features of the specified separation and taking into account the correlation properties of traffic (in particular, the correlation of time intervals between packets arriving for processing), the appearance of which is due to the combination of many variable ON/OFF sources, and the mechanisms for controlling such sources, the emergence of new services and applications and other reasons related to the characteristics of the protocols used. The paper provides an analysis of the influence of the correlation of time intervals between incoming packets on the operation of a node in a software-defined network operating using the Open Flow protocol. Analytical expressions are obtained for calculating the average values of the packet delay time at a network node and the variation of this delay. In this case, the analytical model of a network node is described by the G/G/I system, in which the probability densities of time intervals between incoming packets and packet processing time intervals are specified by hyperexponential models, and the model for the density of time intervals between packets takes into account the correlations of adjacent intervals. A comparison is given of the average delay time in a node and the delay variation in the presence and absence of correlation.

**Keywords:** queue model, software defined networks, quality of service (QoS), hyperexponential distribution, average time for servicing a request in the system, correlation of time intervals

## References

1. ITU-T Recommendations Y.3001 "Next Generation Networks - Future networks". ITU-T, Geneva, May, 2011.
2. Order of the Government of the Russian Federation dated November 24, 2023 No. 3339-r "Strategy for the development of the communications industry of the Russian Federation for the period until 2035". <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312040015?index=2>.
3. A.E. Kucheryavii, M.A. Makolkina, R.V. Kirichek, "Tactile Internet. Communication networks with ultra-low delays," *Telecommunications*. 2016. No. 1, pp. 44-46. (In Russian)
4. A. Roslyakov, "Network-2030": ITU-T's view of the future of fixed-line networks," *First Mile*. 2021. Vol. 4. No. 96, pp. 50-59. (In Russian)
5. B.K. Xiong, J. Yang, Li W. Zhao, K. Li, "Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model. *Computer Networks*," 2016. Vol. 102, pp. 174-183.
6. M.A. Buranova, V. Kartashevskiy, "OpenFlow-based software-defined networking queue model DCCN 2021," *Distributed computer and communication networks: control, computation, communications*, 2021, pp. 275-280.
7. M. Buranova, A. Muthana, "Performance evaluation of software defined networking based on openflow protocol," *2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2021, pp. 143-148.
8. K.E. Samujlov, I.A. Shalimov, I.G. Buzhin, Yu.B. Mironov, "Model funkcionirovaniya telekommunikacionnogo oborudovaniya programmno-konfiguriruemyh setej," *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*, 2018, vol. 14, no 1, pp. 13-26. (In Russian)
9. S. Muhizi, G. Shamshin, A. Muthanna, R. Kirichek, A. Vladyko, A. Koucheryav, "Analysis and Performance Evaluation of SDN Queue Model," *Lecture Notes in Computer Science*, 2017. Vol. 10372, pp. 26-37.
10. H. Okamura, T. Dohi, K.S. Trivedi, "Markovian arrival process parameter estimation with group data," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009. Vol. 17, iss. 4, pp. 1326-1339.
11. I. Kartashevskiy, M. Buranova, "Calculation of Packet Jitter for Correlated Traffic," *Lecture Notes in Computer Science*, 2019. Vol. 11660, pp. 610-620.
12. I.V. Kartashevskiy, "Processing of correlated traffic in infocommunication networks," Moscow: Hot Line – Telecom, 2023. 199 p. (In Russian)
13. H. Dbira, A. Girard, B. Sanso, "Calculation of packet jitter for non-poisson traffic," *Annals of telecommunications*. 2016. Vol. 71. Iss. 5-6, pp. 223-237.
14. V.G. Kartashevskii, M.A. Buranova, "Analysis of Packet Jitter in Multiservice Network. 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology," *PIC S and T 2018 - Conference Proceedings*. 2018, pp. 797-802.
15. M.A. Buranova, V.G. Kartashevskii, R.T. Latypov, "Estimation of jitter in the G/M/1 system based on the use of hyperexponential distributions," *Infokommunikacionnie tekhnologii*, no. 18(1), 2020, pp. 13-20. (In Russian)
16. G.U. Hwang, K. Sohraby, "Performance of correlated queues: the impact of correlated service and inter-arrival times," *Performance Evaluation*. 2004. No. 55, pp. 129-145.
17. I. Cidon, M Sidi, "Analysis of a correlated queue in a communication system," *IEEE Transactions on Information Theory*. 1993. Vol. 39. Iss. 2, pp. 456-465.
18. I.V. Kartashevskiy, A.N. Volkov, R.V. Kirichek, "Analysis of the average latency in a queuing system when processing correlated traffic," *Telecommunications*. 2019. No. 3, pp. 41-50. (In Russian)
19. M.A. Buranova, M.I. Rezyapkina, "Analysis of a correlated queue in the G/G/1 system," *Infocommunication technologies*. 2020. Vol. 18. No. 4, pp. 417-427. (In Russian)
20. M.S Taggu, "Self-similar processes," In S. Kotz and N. Johnson, editors, *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Wiley, New York. 1988. Vol. 8, pp. 352-357.
21. O.I. Sheluhin, A.M., Tenyakshev, A.V. Osin, "Fractal Processes in Telecommunications," Moscow: Radiotekhnika Publ., 2003, 480 p. (In Russian)
22. B.R. Levin, "Theoretical foundations of statistical radio engineering," 3rd ed. Moscow: Radio and Communications, 1989. 656 p.
23. A.N. Malakhov, "Cumulant analysis of random non-Gaussian processes and their transformations," Moscow: Soviet radio, 1978. 376 p. (In Russian)
24. A.G. Sveshnikov, A.N. Tikhonov, "The theory of functions of a complex variable: textbook: for universities," 6th ed. Moscow: FIZMATLIT, 2005. 336 p. (In Russian)

## Information about authors:

**Marina A. Buranova**, Professor of Information Security Department, Doctor of Technical Sciences, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

**Vyacheslav G. Kartashevskiy**, Professor of Information Security Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia