

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation, 23 L.Tolstoy str.; Professor of the Department of Multiservice Networks and Information Security, Doctor of Technical Science, Professor, Vice-president of scientific public Academy of Telecommunications and Informatics. Tel.: +79272609600. E-mail: lixt@psati.ru

References

1. Stepanov S.N. *Teoriya teletrafika. Konceptii, modeli, prilozheniya* [Teletraffic theory. Concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom Publ., 2015. 808 p.
2. Kleinrock L. *Queueing computer systems*, 1976, vol. 2. 576 p. (Russ. ed. Klejnrok L. Vychislitel'nye sistemy s ocheredjami. Moscow, Mir Publ., 1979. 600 p.).
3. Likhttsinder B.Y. Interval'nyj metod analiza trafika mul'tiservisnyh setej [Interval method of traffic analysis in multiservice communication systems]. *Prilozhenie k zhurnalu «Infokommunikacionnye tehnologii»*, 2011, pp. 101-152.
4. Likhttsinder B.Y. *Interval'nyj metod analiza trafika mul'tiservisnyh setej dostupa* [Interval method of traffic analysis in multiservice access networks]. Samara, PGUTI Publ., 2015. 121 p.
5. Likhttsinder B.Y. Korreljacionnye svoystva dlin ocheredej v sistemah massovogo obsluzhivaniya s potokami obshhego vida [Correlation features of queue sizes in queueing systems with common type flows]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 276-280.
6. Likhttsinder B.Y. O nekotoryh obonsheniyah formuli Hinchina-Pollyacheka [About some generalizations of Pollaczek-Khinchin formula]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2007, vol. 5, no. 4, pp. 253-258.
7. Lakatos L. *A note on the Pollaczek-Khinchin formula*. *Annal. Univ. Sci. Budapest Sect. Comp.* 2008, vol. 29, pp. 83-91.
8. Zheng F.U., Wang J. A new method for the Pollaczek-Khinchin formula. *ICIC express letters. Part B, Applications: an international journal of research and surveys*, 2015, vol. 6, pp. 1619-1624.
9. Huang L., Lee T.T. Generalized pollaczek-khinchin formula for markov channels. *Communications, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 61, no. 8, pp. 3530-3540.
10. Huang L. *Generalized Pollaczek-khinchin Formula for Queueing Systems with Markov Modulated Services Rates*: diss. The Chinese University of Hong Kong, 2013.

Received 06.10.2016

УДК 004.7

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ТСП-ОКНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ПАКЕТАМИ ТРАФИКА В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ SDN

Малахов С.В., Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Карташевский И.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: mal@psuti.ru

Рассматривается влияние размера ТСП-окна на числовые характеристики интервалов между пакетами: начальные моменты интервалов с первого по третий, так как разработанная математическая модель использует три первых начальных момента. Исследования проводились на виртуальной экспериментальной установке, которая развернута с помощью платформы OpenNebula на физических серверах. Рассмотрены два случая: программно-конфигурируемая сеть с поддержкой открытого протокола OpenFlow и традиционная сеть без протокола OpenFlow. Программно-конфигурируемая сеть построена с контроллером POX и физическим OpenFlow коммутатором. В качестве инструментальных средств использованы программные продукты tcpdump для захвата трафика и Iperf для генерации трафика. Представлен скрипт, позволяющий автоматизировать процесс запуска генерации трафика. Полученные результаты импортированы в MS Excel и с использованием известных формул математической статистики определяются моментные характеристики временных интервалов.

Ключевые слова: ПКС, программно-конфигурируемые сети, OpenFlow, ТСП-окно, POX, моментные характеристики

Введение

Концепция ПКС (программно-конфигурируемая сеть) заключается в разделении плоскостей данных и управления. ПКС ориентирована на

взаимодействие с пользователем через открытый API. Управление данными передается контроллеру. Это позволяет упростить коммутаторы, сняв с них вычислительную нагрузку. Пересылка паке-

тов осуществляется по таблице маршрутизации, получаемой с контроллера, которая создается не для конкретного пакета, а для типа пакетов – потока [1]. Таким образом, ПКС видится как решение проблем сетей с оборудованием разных производителей, когда конфигурирование сети затруднено специфичностью оборудования и разным подходом к управлению.

Протокол OpenFlow [2] на данный момент является популярным решением для построения ПКС. Но, к сожалению, его недостаточно своевременная поддержка со стороны производителей не позволяет в полной мере использовать все функции по управлению сетью.

ТСР-окно

В рамках соединения правильность передачи каждого сегмента должна подтверждаться квитанцией получателя. Квитирование – это один из традиционных методов обеспечения надежной связи. Для того чтобы можно было организовать повторную передачу искаженных данных, отправитель нумерует отправляемые единицы передаваемых данных (далее кадры). Для каждого кадра отправитель ожидает от приемника так называемую положительную квитанцию – служебное сообщение, извещающее о том, что исходный кадр был получен и данные в нем оказались корректными. Время этого ожидания ограничено – при отправке каждого кадра передатчик запускает таймер, и если по его истечении положительная квитанция не получена, то кадр считается утерянным.

Для повышения нагрузки на канал связи источнику разрешается передать некоторое количество кадров в непрерывном режиме, то есть в максимально возможном для источника темпе, без получения на эти кадры ответных квитанций. Количество кадров, которые разрешается передавать таким образом, называется размером ТСР окна [3].

Определение числовых характеристик временных интервалов

С использованием известных формул математической статистики определяются моментные характеристики временных интервалов [4]. В работе использованы статистики до третьего порядка, которые позволяют судить о характере распределения интервалов. Например, коэффициент вариации показывает отличие трафика от пуассоновского потока и совместно с асимметрией позволяет судить о степени весомости хвостов распределений интервалов между пакетами [5-6].

Среднее значение интервала между соседними пакетами равно $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k)$, где t_k – моменты времени поступления пакетов; N – число анализируемых интервалов. Выборочная дисперсия равна $D_g = \overline{t^2} - \bar{t}^2$, где второй начальный момент $\overline{t^2} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k)^2$.

Коэффициент вариации $c = \sigma_g / \bar{t}$, где $\sigma_g = \sqrt{D_g}$; коэффициент асимметрии находится по формуле $A_s = (\overline{t^3} - 3\bar{t}^2 \tau + 2\bar{t}^3) / \sigma_g^3$, где третий начальный момент $\overline{t^3} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (t_{k+1} - t_k)^3$.

Проведение эксперимента

Необходимо определить зависимость моментных характеристик временных интервалов от размера ТСР-окна как с поддержкой протокола, так и без него. Для исследования поведения пакетов было решено собрать экспериментальный сегмент сети, показанный на рис. 1.

На серверах Node развернут виртуальный кластер из 12 узлов с помощью платформы OpenNebula [7], которая установлена на Server. OpenNebula – это платформа для организации управления cloud-инфраструктурой и виртуальными окружениями, которая позволяет организовать работу локальной облачной инфраструктуры, обеспечить работу гибридной схемы, комбинируя ресурсы локального дата-центра и внешних облачных провайдеров.

Физический кластер коммутируется гигабитным коммутатором HP 3500yl, который поддерживает протокол OpenFlow. Режимы настроек потоков реактивный (Reactive), когда коммутатор принимает поток, запись о котором отсутствует в таблице, он запрашивает контроллер о правилах обработки данного потока.

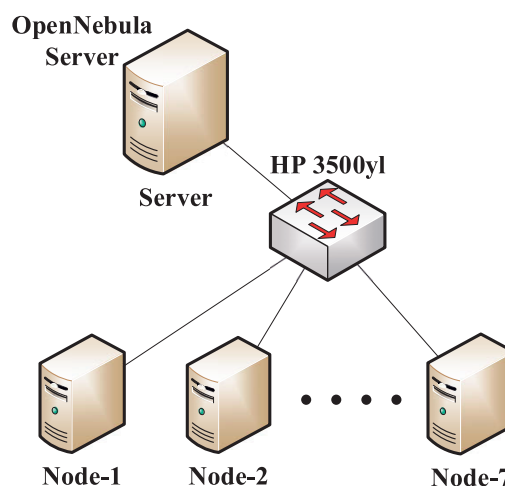


Рис. 1. Экспериментальный сегмент сети

Виртуальный кластер сети (см. рис. 2) состоит из контроллера POX (сетевая операционная система), программы tcpdump (для захвата трафика) и клиентов, которые генерируют трафик (см. рис. 3).

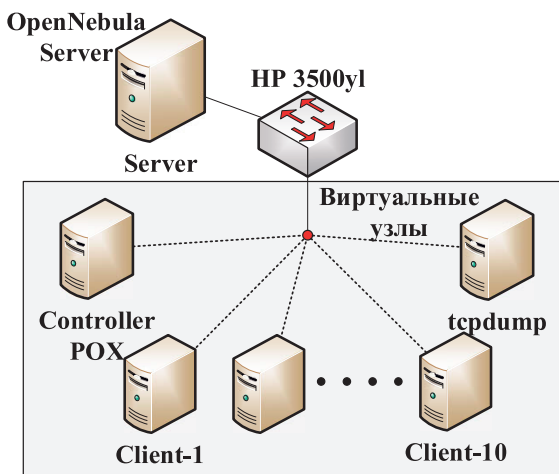


Рис. 2. Виртуальный кластер

Трафик генерируется с помощью утилиты Iperf, установленной на узлах кластера. Iperf - кросс-платформенная консольная клиент-серверная программа – генератор TCP, UDP и SCTP трафика для тестирования пропускной способности сети.

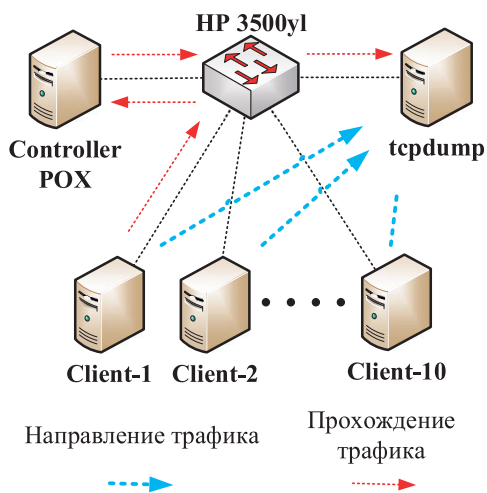


Рис. 3. Структура трафика

На каждом из клиентов запускается утилита Iperf со следующими параметрами: f – формат вывода значений, t время генерации пакетов, m – выводить максимальный размер полезного блока данных (MSS) и максимальный размер кадра (MTU), p – порт, w – размер TCP-окна. Размер генерируемых TCP пакетов по умолчанию 1500 байт. Были выбраны следующие размеры TCP-окна: 8 КБ, 16 КБ, 32 КБ, 64 КБ, 128 КБ и 256 КБ. Трафик генерируется в направлении tcpdump,

на котором утилита Iperf запущена с параметром сервера [7-8].

Ниже представлен скрипт, который позволяет автоматизировать процесс запуска генерации:

```
IP=10.0.0.{15}
SERVER_IP=[ip-адрес сервера]
killall -9 iperf
killall -9 tcpdump
dat=`date +%H-%M-%S`
contr=[ip-адрес контроллера]
j=1;
for j in 8 16 32 64 128 256; do
tcpdump -i eth1 -n -ttt port 80 > /tmp/$j-server.txt &
rsh $contr killall -9 tcpdump
rsh $contr tcpdump -i eth0 -n -ttt port 6633 \> /
tmp/$j-contr.txt \& \&
iperf -s -p 80 -D -w $jk
for i in {15..24}; do
ip=10.0.0.$i
echo $ip
rsh $ip killall -9 iperf
rsh $ip /usr/bin/iperf -f k -t 30 -m -p 80 -w $j\k -c
$SERVER_IP \>/tmp/$i-$j-iperf.txt &
done;
sleep 40
killall -9 iperf
killall -9 tcpdump
rsh $contr killall -9 tcpdump
for i in {15..24}; do
ip=10.0.0.$i
mkdir $dat
scp $ip:/tmp/$i-$j-iperf.txt /tmp/$dat
done;
cp $j-server.txt /tmp/$dat
scp $contr:/tmp/$j-contr.txt /tmp/$dat
done;
```

Результаты эксперимента

Для анализа результатов понадобится обработать файлы логов выполнения эксперимента. Файлы располагаются на серверах tcpdump. Для расчета моментных характеристик данные из лог-файлов были импортированы в MS Excel.

В таблице 1 представлены результаты шести экспериментов с разными значениями размера TCP-окна без поддержки протокола OpenFlow, где отображены найденные характеристики, такие как первый начальный момент, второй начальный момент, дисперсия, коэффициент вариации, асимметрия, количество дошедших пакетов, время эксперимента.

В таблице 2 представлены аналогичные результаты экспериментов с поддержкой протокола OpenFlow, где отображены найденные моментные характеристики временных интервалов.

Таблица 1. Влияние размера ТСР-окна на моментные характеристики интервала между пакетами трафика в ПКС

Размер ТСР-окна	8 КБ	16 КБ	32 КБ	64 КБ	128 КБ	256 КБ
$\bar{\tau}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$
D_g	$1,32 \cdot 10^{-7}$	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$5,61 \cdot 10^{-7}$	$8,44 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$
\bar{t}^2	$1,58 \cdot 10^{-7}$	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$6,02 \cdot 10^{-7}$	$8,88 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$
c	2,25	2,86	3,70	4,40	4,70	8,35
A_s	3,99	5,08	6,82	8,13	13,9	22,4
\bar{t}^3	$2,59 \cdot 10^{-10}$	$1,30 \cdot 10^{-9}$	$3,22 \cdot 10^{-9}$	$6,84 \cdot 10^{-9}$	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$5,07 \cdot 10^{-2}$
Число пакетов	208342	160638	169183	167767	169700	1238
Время моделирования	33,70	33,43	34,21	35,05	36,23	19,33

Таблица 2. Влияние размера ТСР-окна на моментные характеристики интервала между пакетами трафика в ПКС

Размер ТСР-окна	8 КБ	16 КБ	32 КБ	64 КБ	128 КБ	256 КБ
$\bar{\tau}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$
D_g	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$4,91 \cdot 10^{-6}$	$6,26 \cdot 10^{-6}$	$8,58 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$
\bar{t}^2	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$6,88 \cdot 10^{-6}$	$8,35 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$
c	1,32	1,58	1,72	1,76	2,16	2,38
A_s	2,45	3,47	4,68	4,11	6,04	7,65
\bar{t}^3	$2,79 \cdot 10^{-8}$	$6,13 \cdot 10^{-8}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-7}$	$8,01 \cdot 10^{-7}$
Число пакетов	27987	28084	30036	29989	34767	36957
Время моделирования	37,15	39,38	43,46	49,92	61,60	69,13

Полученные данные свидетельствуют о том, что анализируемый трафик сильно отличается от пуассоновского (коэффициент вариации $c > 1$), значение асимметрии $A_s > 2$ говорит о том, что распределение интервалов между пакетами трафика относится к распределениям, похожим на гиперэкспоненциальное, и соответствует системам массового обслуживания (СМО) $H_2/M/1$ [4-5], $H_2/H_2/1$ [9]. Способы аппроксимации произвольных распределений гиперэкспоненциальным подробно рассмотрены в [10-11].

Заключение

В ходе проведения экспериментов были получены моментные характеристики интервалов между пакетами трафика в сетях SDN с протоколом OpenFlow и без. Для оценки показателей эффективности функционирования сети может быть использована система массового обслуживания $H_2/M/1$ с гиперэкспоненциальным распределением второго порядка входящего трафика. Значения всех числовых характеристик с увеличением размера ТСР-окна увеличиваются в рассматриваемых

случаях. Количество пакетов для эксперимента без протокола OpenFlow увеличивается на размерах ТСР-окна от 8КБ до 128КБ, потом резко падает с 169700 до 1238 при размере окна 256КБ. В случае с поддержкой протокола этого не наблюдается и количество пакетов увеличивается.

Число пакетов, дошедших до адресата без протокола OpenFlow, на порядок больше, чем с поддержкой протокола OpenFlow. Это говорит о том, что дополнительную задержку в сеть вносит контроллер OpenFlow. Этот факт следует учитывать, особенно в случае высокой нагрузки на программно-конфигурируемые сети. В нашем случае эксперименты проводились для случаев невысокой нагрузки на каналы.

Литература

1. Исследование способов управления QoS в программно-конфигурируемых сетях с помощью контроллера RYU // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20104> (д.о. 25.06.16).

2. OpenFlow // Open Networking Foundation // URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow> (д.о. 28.08.16).
3. Протокол надежной доставки сообщений TCP // CIT Forum. URL: http://citforum.ru/nets/ip/glava_6.shtml (дата обращения: 28.08.16).
4. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А., Малахов С.В. Анализ и расчет входящего трафика на уровне трех моментов распределений // Информационные технологии. №9, 2014. – С. 54-59.
5. Тарасов В.Н., Карташевский И.В., Малахов С.В. Теоретическое и экспериментальное исследование задержки в программно-конфигурируемых сетях // Инфокоммуникационные технологии. Т.13, №4, 2015. – С. 409-413.
6. Tarasov V.N., Malakhov S.V. Statistical data handling program of Wireshark analyzer and incoming traffic research // Proceedings of the Institute for System Programming. Vol. 27(3), 2015. – P. 303-314.
7. OpenNebula.org // URL: <http://opennebula.org> (д.о. 15.07.16).
8. Тарасов В.Н., Малахов С.В. Экспериментальные исследования производительности сегмента программно-конфигурируемой сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. №2, 2013. – С. 81-85.
9. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания H2/H2/1 // Системы управления и информационные технологии. Т. 57, № 3, 2014. – С. 92-96.
10. Тарасов В.Н. Исследование систем массового обслуживания с гиперэкспоненциальными входными распределениями // Проблемы передачи информации. №1, 2016. – С.16-26.
11. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Способы аппроксимации входных распределений для системы G/G/1 и анализ полученных результатов // Системы управления и информационные технологии. № 3.1, 2015. – С. 182-185.

Получено 20.09.2016

Малахов Сергей Валериевич, к.т.н., старший преподаватель Кафедры программного обеспечения и управления в технических системах (ПОУТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: malakhov-sv@psuti.ru

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой ПОУТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Бахарева Надежда Федоровна, д.т.н., профессор, заведующая Кафедрой информатики и вычислительной техники ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Карташевский Игорь Вячеславович, к.т.н., доцент Кафедры ПОУТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-13. E-mail: ivk@psuti.ru

EFFECT OF TCP-WINDOW SIZE ON DISTRIBUTION OF TIME SLOTS BETWEEN TRAFFIC PACKETS IN SOFTWARE-DEFINED SDN NETWORKS

*Malakhov S.V., Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kartashevskiy I.V.
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: mal@psuti.ru*

This work considers effect of TCP-window size on the numerical characteristics of time slots between packets. Here we researched first three initial time slot moments due to developed mathematical model utilizes them. Researches were performed on virtual experimental setup installed over physical servers by OpenNebula platform. We considered two cases including software-defined network supporting OpenFlow open protocol and conventional network without it. The first one is performed with POX controller and physical switch. Here we utilize software products tcpdump for traffic capture and Iperf for traffic generation. This work presents script providing traffic generation initiation process automation. Obtained results were imported to MS Excel. Then moment characteristics are evaluated by well-known mathematical statistics formulas.

Keywords: software defined networks, OpenFlow, TCP window, POX, moment characteristics

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.4.06

Malakhov Sergey Valerievich, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Senior Lecturer of the the Head of Department of Software and Management in Technical Systems. Tel. +78462280013. E-mail: malakhov-sv@psuti.ru

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; the Head of Department of Software and Management in Technical Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +78462280013; E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Bakhareva Nadezhda Fedorovna, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; the Head of Department of Informatics and Computer Technics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +78462280013 E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Kartashevskiy Igor Viacheslavovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Assistant Professor of the Department of Software and Management in Technical Systems, PhD in Technical Science. Tel. +78462280013. E-mail: ivk@psuti.ru

References

1. Sadv O.L., Tivikov N.V. Issledovanie sposobov upravleniya Qos v programmno-konfiguriruemyyh setiah s pomoschyu kontrollera Ryu [Research of ways of management of qos in the program configured networks by means of the ryu controller]. *Sovreemennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1-2. Available at <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20104> (accessed 25.06.16)
2. OpenFlow. Open Networking Foundation. Available at: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow> (accessed 28.08.16).
3. Protocol TCP. CIT Forum. Available at: http://citforum.ru/nets/ip/glava_6.shtml (accessed 28.08.16).
4. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Gorelov G.A., Malakhov S.V. Analiz I raschet vhodiaschego trafika na urovne treh momentov raspredeleniy [Analyzing the Incoming Traffic at the Three Moments Distribution of Time Intervals]. *Informacionnyye tehnologii*, 2014, no. 9, pp. 54-59.
5. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V, Malakhov S.V. Teoreticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie zaderzhki v programmno-konfiguriruemyyh setiah [Theoretical and experimental research of packet delays in software defined networks]. *Infokommunikacionnyye tehnologii*, 2015, no. 4, pp. 409-413.
6. Tarasov V.N., Malakhov S.V. Statistical data handling program of Wireshark analyzer and incoming traffic research. *Proceedings of the Institute for System Programming*, 2015, no. 27, pp. 303-314.
7. OpenNebula. Official site of OpenNebula project. Available at: <http://opennebula.org> (accessed 15.07.16).
8. Tarasov V.N., Malakhov S.V. Eksperimentalniye issledovaniya proizvoditelnosti segmenta programmno-konfiguriruemoi seti [Experimental studies of software configurable network segment capacity]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2013, no. 2, pp. 81-85.
9. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovaniy v upravliaemoi sisteme massovogo obsluzhivaniya H2/H2/1 [Determination of the average waiting time in controllable queuing system H2/H2/1]. *Sistemy upravleniya i informatsionniye tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 92-95.
10. Tarasov V.N. Analysis of queues with hyperexponential arrival distributions. *Problems of Information Transmission*, 2016, no. 52:1, pp. 14-23. doi:10.1134/S0032946016010038
11. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Sposoby Approksimatsii vhodnyh rapredeleniy dlia sistemy G/G/1 i analiz poluchennykh rezultatov [Approximation methods for input distributions of queuing system G/G/1] *Sistemy upravleniya i informatsionniye tehnologii*, 2015, no. 3.1, pp. 182-185.

Received 20.09.2016